INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CIENCIA POLAR
Fusión del hielo antártico

PALEONTOLOGÍA
Adaptación de los saurópodos

MEDICINA
Genética de los controladores del VIH

EL BOSÓN DE HIGGS

El hallazgo de una nueva partícula marca un hito histórico para la física

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL BOSÓN DE HIGGS | FUSIÓN DEL HIELO ANTÁRTICO | ADAPTACIÓN DE LOS SAURÓPODOS

N.º 432

SEPTIEMBRE 2012

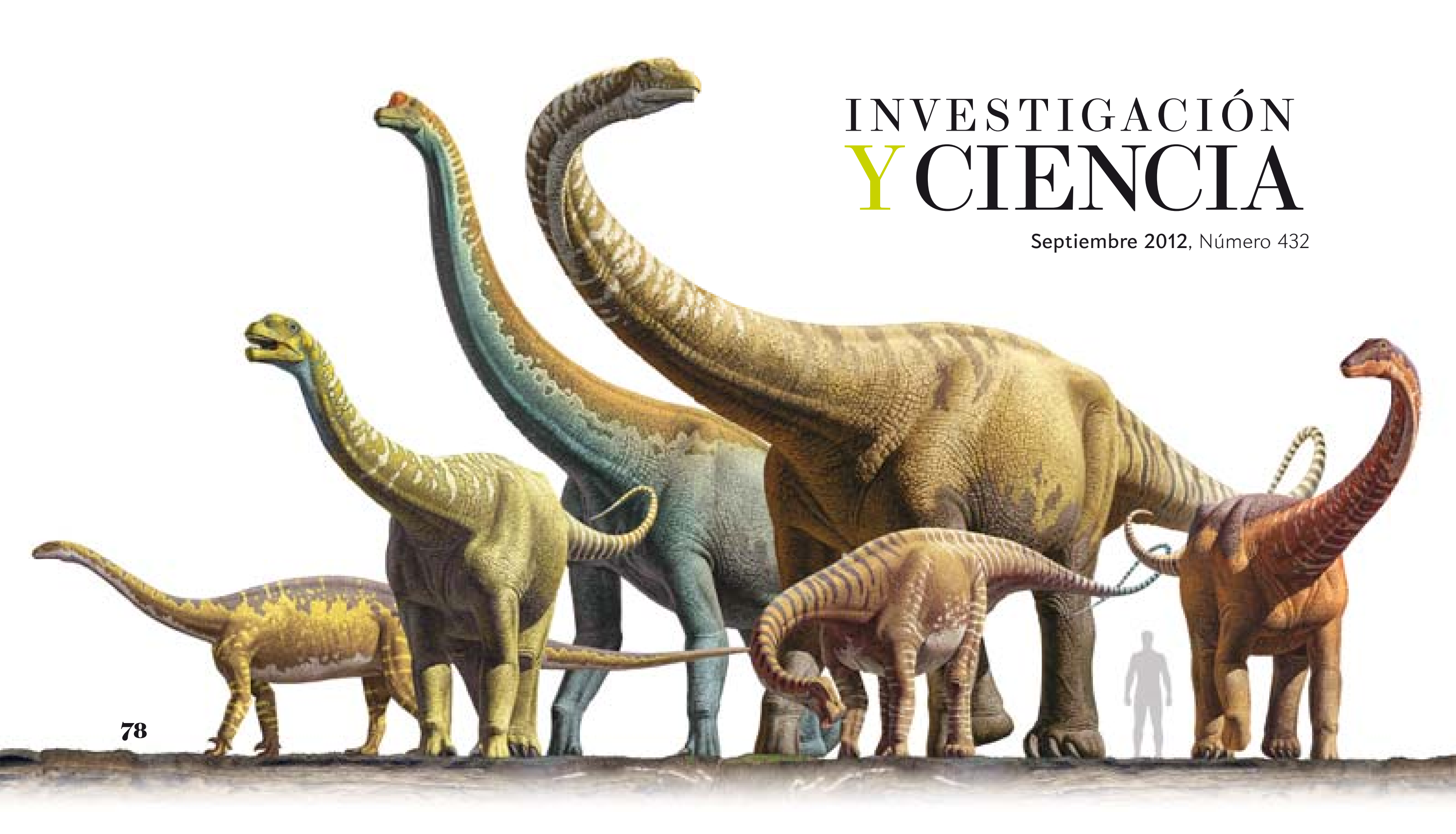


00432

9 770210 136004

6,50 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Septiembre 2012, Número 432



ARTÍCULOS



4



8



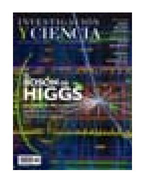
90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Los experimentos ATLAS y CMS del LHC han descubierto una nueva partícula subatómica que parece corresponderse con el bosón de Higgs: un hallazgo histórico producto de un encomiable esfuerzo colectivo. Esta colisión registrada en el detector ATLAS muestra uno de los raros sucesos en los que los expertos creen que podría haberse producido la anhelada partícula. Imagen cortesía del CERN.



redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto 2012

PRECISIÓN SOBRE MARTE

Con relación al Laboratorio Científico para Marte (MSL) y su robot explorador *Curiosity* [«Estudiando el planeta rojo», por J. P. Grotziger y A. Vasavada; Investigación y Ciencia, agosto de 2012], me gustaría apuntar que esta ha sido la primera nave de la historia que ha realizado un vuelo atmosférico guiado en otro mundo. Un hecho que, sorprendentemente, han pasado por alto la mayoría de los medios de comunicación.

El vuelo atmosférico guiado ha supuesto la clave para que el MSL aterrizase con la precisión que exigía garantizar el acceso a un lugar concreto y de interés científico. Al mismo tiempo, este avance se ha constituido en uno de los elementos más significativos con los que esta misión contribuirá a la exploración robótica y humana de Marte en el futuro. Hasta ahora, todas las sondas que habían atravesado la atmósfera de otros mundos lo habían hecho de forma balística; esto es, no controlada. En el caso del MSL, gracias al vuelo atmosférico guiado se ha conseguido reducir el error máximo del aterrizaje a un radio de 10 kilómetros. Ello contrasta de modo notable con el error potencial de entre 75 y 200 kilómetros del que adolecían las sondas *Spirit* y *Opportunity*. Otra ventaja apenas divulgada de esta técnica reside en la posibilidad que brinda de aterrizar en lugares más elevados. Esta capacidad, hasta ahora inexistente, no ha sido aprovechada por el MSL, ya que el comité que seleccionó el lugar de aterrizaje se decantó por un emplazamiento situado a 4,4 kilómetros por debajo de la elevación media marciana.

Gracias al vuelo atmosférico guiado, la nave MSL ha dado un paso de gigante en lo que se refiere a la precisión de los aterrizajes marcianos y a la capacidad de acceso a emplazamientos hasta ahora inaccesibles. Ambas facultades resultarán trascendentales para las misiones futuras. La primera de ellas, de hecho, resultará crítica para las misiones tripuladas, las cuales requerirán una precisión en el aterrizaje del orden de decenas de metros.

Eduardo García Llama
Centro Espacial Johnson de la NASA
Houston

PRUEBAS EN POSITIVO

El artículo de Marc B. Garnick sobre el cáncer de próstata [«El debate del cáncer de próstata»; Investigación y Ciencia, abril de 2012] pasa por alto una consideración muy importante a la hora de abogar por una detección sistemática más moderada. Aunque no suceda con demasiada frecuencia, morir a causa de un cáncer no tratado puede convertirse en un proceso muy lento y doloroso. Preferiría morir de cualquier otro modo.

Por otro lado, el tratamiento de un cáncer de próstata en estado avanzado no es agradable. En mi caso, el tumor se me extirpó nada más ser diagnosticado, pero el de mi hermano ya se encontraba demasiado desarrollado. Hoy recibe tratamiento con hormonas y otros fármacos, y su vida no es nada envidiable: sufre sobrepeso, sofocos, trastornos cardiacos e incontinencia, entre otros problemas. Para mí, la prueba del PSA (antígeno prostático específico) cayó como un regalo del cielo.

Joe Cusack
Scottsdale, Arizona

Lo que debería debatirse no es cuántos tumores de bajo riesgo se detectan en las campañas generalizadas de la prueba del PSA, sino cuántos tumores de grado medio y alto salen a la luz. El hecho de que la prueba del PSA pueda alertar de la posibilidad de un cáncer agresivo con mayor antelación que cualquier otra prueba no invasiva debería bastar para justificar que los hombres nos sometamos con cierta regularidad a esta clase de análisis. La pregunta correcta es cuál debería ser la periodicidad de esas pruebas y a qué edad deberían dar comienzo, pero no si procede suprimirlas.

Henry Maze
San Mateo, California

Responde Garnick: *La pregunta fundamental es si la detección sistemática de cáncer de próstata reduce o no la tasa de mortalidad y los padecimientos asociados a la enfermedad. Tras estos programas subyace la idea de que el cáncer se inicia en un foco microscópico, se convierte en un tumor localizado (más avanzado en el órgano en el que se originó), produce metástasis y acaba por arrebatar la vida al paciente. Por consiguiente, la detección y localización «precoz» de estos cánceres debería salvar vidas. Sin embargo, aunque casi todos los programas de detección sistemática encuentran tumores que parecen menos agresivos y desarrollados que los que se descubren más tarde, las esperadas mejoras en la tasa de supervivencia no se han materializado.*

Aunque resulta tranquilizador pensar que «atrapar» un cáncer de próstata en su primera fase de desarrollo salvará vidas, los factores de mayor importancia probablemente sean las complejidades y las características genéticas que acabarán por determinar el comportamiento biológico de la enfermedad. Los oncólogos mantienen la esperanza de que, en el futuro, se desarrollen biomarcadores que no solo nos informen de la presencia de un cáncer, sino también de cuál será su evolución más probable y, por tanto, sobre la necesidad de tratamiento.



Abril 2012

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

RADIACTIVIDAD

Deshacerse del plutonio

La gran mayoría del plutonio que existe en nuestro planeta es artificial: unas 500 toneladas métricas, lo suficiente para fabricar 100.000 armas nucleares. Gran parte procede de la carrera armamentística entre Estados Unidos y la antigua Unión Soviética, pero una fracción creciente tiene su origen en el uso civil de la energía nuclear.

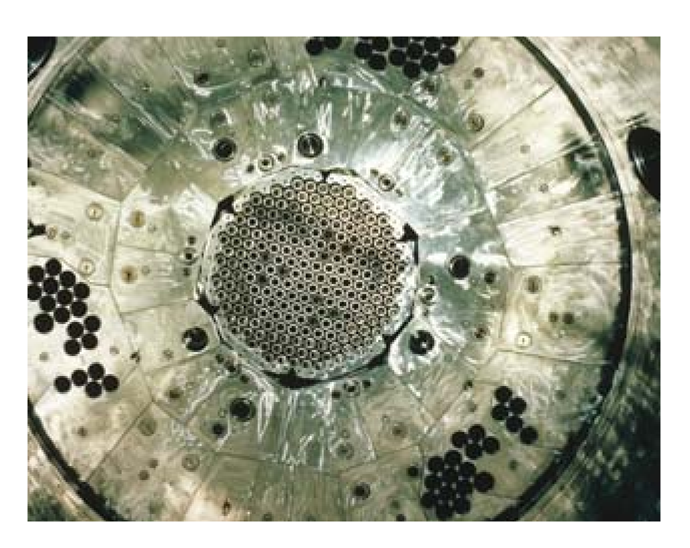
Un grupo de físicos y expertos en medioambiente ha sugerido que la única solución razonable al problema que plantea la acumulación de plutonio consistiría en enterrarlo. En un comentario publicado en mayo en la revista *Nature*, recomendaban que el Reino Unido abriese el camino realizando estudios sobre cómo encerrar este «elemento infernal» en recipientes cerámicos que, después, pudiesen enterrarse en cavernas o pozos muy profundos.

Hasta ahora se han preferido otras opciones. El Reino Unido parece inclinarse a seguir el ejemplo de Francia y Japón, donde se intenta usar el plutonio para fabricar combustible nuclear de mezcla de óxidos (MOX), que combina óxidos de uranio y plutonio. Estados Unidos ha optado por la misma solución, por lo que ha decidido invertir 13.000 millones en una instalación de Carolina del Sur para convertir 34 toneladas de sus reservas de plutonio en MOX, si bien este producto resulta más caro y difícil de manipular que el combustible tradicional.

Japón, Francia, Rusia y Estados Unidos también han usado plutonio como combustible para los reactores nucleares de alta velocidad, que utilizan neutrones para iniciar la fisión. El problema reside en que dichas centrales no se refrigeran con agua, sino con sodio líquido, muy inflamable. Además, también generan residuos radiactivos, lo que no hace sino postergar el problema.

Así pues, ¿por qué no decidirse por la opción más económica y confinar el plutonio para enterrarlo después? Ello quizá se deba a que encontrar un lugar en el que depositarlo comporta serios problemas políticos. En Estados Unidos, las montañas Yucca fueron propuestas en la década de los ochenta como último destino para los residuos radiactivos, pero hoy siguen tan lejos de convertirse en una solución como entonces. Y, según un informe de la Oficina de Responsabilidad Gubernamental estadounidense publicado en abril, el país tampoco está preparado económicamente para desmantelar los viejos reactores nucleares y ocuparse de los residuos resultantes.

El problema para tratar el plutonio «sin ambigüedades, como el peligroso material armamentístico que es», en palabras de los científicos, reside en que muy pocos estarían dispuestos a pagar para que se enterrase cerca de su casa, aunque fuese a gran profundidad. *—David Biello*



Núcleo de un reactor de alta velocidad, refrigerado con sodio.

¿QUÉ ES ESTO?

Aglomeraciones marinas: Después de que el océano haya retrocedido, el agua permanece en las cavidades rocosas de la costa y se forman pozas de marea rebosantes de vida marina. El fotógrafo Ted Morrison captó en sus imágenes la flora y la fauna existente en los más de sesenta kilómetros de costa rocosa del Parque Nacional de Acadia, en Maine. En este primer plano de una pequeña poza de marea, Morrison descubrió la floreciente especie de bellota de mar *Semibalanus balanoides* (*amarillo*), junto con las motas oscuras del mejillón común, *Mytilus edulis,* y un alga del género *Fucus* que se entrevé en el agua en el centro de la imagen. Son tres de los organismos marinos más habituales hallados en las costas de Nueva Inglaterra, afirma Susan Brawley, catedrática de ciencias del mar de la Universidad de Maine. El mejor momento para contemplar estos pequeños ecosistemas corresponde a la bajamar de la luna llena y la luna nueva de primavera. *—Ann Chin*



PHOTO RESEARCHERS, INC. (*reactor*); TED MORRISON (*poza de marea*)



MATEMÁTICAS

Por qué toda clasificación es imperfecta

Las decisiones relativas a los productos que compramos, las páginas de Internet que visitamos, las películas que vemos e incluso las universidades a las que van nuestros hijos se ven afectadas por la existencia de *rankings*, o tablas clasificatorias. Pero ¿se ha preguntado alguna vez quién o qué las determina? ¿Se trata de opiniones subjetivas, o hay algo más profundo?

Pongámonos en el lugar de Mark Zuckerberg cuando puntuó y clasificó a las estudiantes de Harvard en Facemash, el predecesor de Facebook. El método más sencillo habría consistido en pedir a la gente que votase a su favorita y, después, otorgar a cada estudiante tantos puntos como número de votos recibidos. Sin embargo, en muy raras ocasiones son todos los votos iguales: en general, el de alguien desinformado no resultará tan valioso como el de un experto. En el caso de Facemash, el sexo de los votantes seguramente desempeñase algún papel.

El problema reside en que asignar un peso a cada votante no suele resultar factible, más aún si se desconoce su identidad. Una alternativa consiste en recurrir al sistema de las Bowl Championship Series (BCS), empleado para clasificar a los equipos universitarios de fútbol americano. Aplicado a una lista de las diez estudiantes más guapas, funcionaría de la siguiente manera: se pide a los votantes que asignen 10 puntos a su favorita, 9 a la segunda, etcétera. La clasificación final se obtendría al sumar las puntuaciones obtenidas por cada una.

No obstante, la mayoría de los aficionados al fútbol americano prefieren que los equipos sean clasificados según los resultados que obtienen en competiciones reales. De hecho, la presión del público es tal que los responsables de la competición anunciaron el pasado mes de abril que estaban sopesando la posibilidad de realizar eliminatorias para la liga de 2014. Zuckerberg sabía instintivamente que efectuar comparaciones directas constituía un método mucho mejor para elaborar una clasificación. Por ello, estableció un sistema de cotejo por parejas, basado en mostrar dos fotografías y preguntar cuál de las dos estudiantes era la más atractiva. Después, establecer una valoración resulta sencillo: se asigna un punto a la ganadora y cero a la perdedora (o medio punto a cada una en caso de empate).

¿Cómo se transforma lo anterior en una clasificación? Arpad Elo, físico de origen húngaro y gran aficionado al ajedrez, propuso establecer un nivel medio de rendimiento para cada ajedrecista a partir de sus resultados en las competiciones. Una vez que un jugador tuviese una puntuación, esta solo se alteraría en la medida en que la persona consiguiese resultados superiores o inferiores a su media. La idea de Elo fue perfeccionada más tarde, cuando el rendimiento medio de cada jugador se sustituyó por un valor relativo que reflejaba la actuación que se esperaba de él al enfrentarse a otro individuo. Así, la diferencia entre la puntuación de dos jugadores debía sugerir lo que cabría esperar en caso de que se enfrentasen.

La elegante idea de Elo se ha aplicado a todo tipo de deportes, incluidas las dos variantes del fútbol, si bien el método debe adaptarse a las características específicas de cada competición. Con todo, nunca podremos decir que ninguno de ellos sea la mejor forma de establecer clasificaciones, pues el «método óptimo» no existe: en 1951, el matemático y economista Kenneth Arrow demostró que no puede haber un sistema de clasificación óptimo que, a la vez, satisfaga unos criterios mínimos de equidad. De modo que la controversia continuará, y los encargados de elaborar las tablas clasificatorias deberán seguir precisando y adaptando sus sistemas para ajustarlos a las necesidades de cada caso.

—Amy N. Langville y Carl D. Meyer

PARQUE DE LAS CIENCIAS (*antílope*); TONY CORDOZA, GETTY IMAGES (*medalla*)

AGENDA

EXPOSICIONES

Galvani, Volta... y el desfibrilador
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Madrid
www.muncyt.es

La prehistoria en el Sáhara Occidental. Megalitismo y arte rupestre
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



OTROS

Del 4 al 7 de septiembre
Taller de ciencias para mentes jóvenes
Instituto de Ciencias Fotónicas
Castelldefels
www.epsyoungminds.org/section/Barcelona

18 de septiembre - Debate
Primavera silenciosa, 50 años después
Campus Gutenberg
Universidad Pompeu Fabra
Barcelona
www.occ.upf.edu/gutenberg

21 y 22 de septiembre - Congreso
Cromosomas, células madre y enfermedad
Centro de Regulación Genómica
Barcelona
www.crg.eu/chromosomes_meeting

28 de septiembre
La noche de los investigadores
Madrid
www.madrimasd.org/lanochedelosinvestigadores
Zaragoza
lanochedelosinvestigadores.esciencia.es

Del 28 al 30 de septiembre
CTS en la enseñanza de las Ciencias
VII Seminario Ibérico
III Seminario Iberoamericano
IES San Isidro
Madrid
oei.es/seminarioctsm

SALUD

Pesticidas y desarrollo cerebral

Aunque el uso en interiores del pesticida clorpirifós ha estado prohibido en EE.UU. desde el año 2000, sus efectos sobre el cerebro continúan detectándose en niños que ahora se acercan a la pubertad. Gracias a la técnica de formación de imágenes por resonancia magnética, un estudio reciente detectó alteraciones en el cerebro de niños que habían estado expuestos al clorpirifós durante la gestación. Dichas alteraciones habrían persistido durante la infancia.

Los investigadores examinaron los escáneres cerebrales de veinte niños cuya madre había presentado niveles altos de clorpirifós en sangre durante el embarazo (según las mediciones del suero del cordón umbilical). Como explica Virginia Rauh, autora principal del estudio y epidemióloga de la Escuela Mailman de Salud Pública de la Universidad de Columbia, las imágenes mostraban diferencias significativas con respecto a las de niños cuya exposición al producto había sido menor: «Alguna perturbación tuvo lugar durante el desarrollo del cerebro», señala. Los resultados se publicaron a finales de abril en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

Los seis niños y catorce niñas cuya madre sufrió exposición al clorpirifós, un producto de uso común antes de la prohibición, contaban entre siete y casi diez años de edad. Todos pertenecían a familias dominicanas o afroamericanas del área de Nueva York. En comparación con otros veinte niños del mismo tipo de familias de Nueva York que habían mostrado niveles bajos de clorpirifós en la sangre de su cordón umbilical, los pequeños en los que se detectaron dosis más elevadas exhibían protuberancias en algunas regiones de la corteza cerebral, así como una reducción del espesor en otras.

Aunque el estudio no halló ningún tipo de trastorno relacionado con esas alteraciones, las regiones afectadas se encuentran asociadas a funciones como la atención, la toma de decisiones, el lenguaje, el control de los impulsos y la memoria de trabajo. En el pasado ya se habían referido resultados similares en animales. El producto continúa usándose de manera habitual en la agricultura. Por fortuna, lavar las frutas y las verduras elimina los restos de clorpirifós y reduce notablemente el riesgo. *—David Biello*



Las regiones cerebrales marcadas en rojo mostraban un crecimiento anormal en niños expuestos a niveles elevados de clorpirifós durante la gestación.

CONSERVACIÓN

Seguir la pista a las tortugas desde el espacio

Con novecientos kilos de peso y dos metros de longitud, las tortugas laúd son los mayores reptiles existentes en la actualidad. Su tamaño, sin embargo, oculta una gran fragilidad: las poblaciones que viven en el océano Pacífico se han reducido en un noventa por ciento en los últimos veinte años. Los biólogos ya sabían que las artes de pesca ocasionaban problemas a estos animales en peligro de extinción, al quedar atrapados en las redes de los pesqueros de arrastre, pero no estaban seguros de dónde y cuándo sufrían tales agresiones.

Las tortugas recorren miles de kilómetros por el Pacífico, así que no hay forma de rastrear su itinerario desde tierra o desde un barco, afirma Helen Bailey, bióloga marina del Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Maryland. Así pues, Bailey y sus colaboradores decidieron seguir sus movimientos mediante satélite. Colocaron arneses con dispositivos de rastreo en las blandas conchas de las tortugas laúd, de manera que estos transmitiesen una señal cada vez que las tortugas ascendían a la superficie. El estudio, publicado en el número de abril de *Ecological Applications*, señala con precisión las zonas de peligro en las que coinciden tortugas y arrastreros. Los datos ayudarán a que las agencias reguladoras decidan cuándo y dónde limitarán la pesca para proteger a la especie.

Los investigadores siguieron, a lo largo de quince años, a 135 tortugas hembra, algunas de la zona oriental del Pacífico y otras de

INMUNOLOGÍA

¿Por qué estornudar es saludable?

La mayoría de los expertos consideran que las alergias son reacciones inmunitarias anómalas a sustancias inocuas, como el polen o los cacahuetes. Algunos investigadores, sin embargo, han propuesto una teoría diferente: el goteo nasal, la tos y las erupciones cutáneas habrían aparecido evolutivamente para protegernos de sustancias tóxicas, como el veneno de serpiente, presentes en nuestro entorno y en los alimentos que ingerimos.

Hace mucho tiempo que los inmunólogos piensan que las personas alérgicas son víctimas de una respuesta de tipo 2 anómala, que habrían adquirido durante la evolución para defenderse de los parásitos. La respuesta de tipo 2 refuerza las barreras de protección del cuerpo y promueve la expulsión del parásito.

La otra forma en la que nuestro cuerpo lucha contra sustancias dañinas consiste en la respuesta de tipo 1, que destruye directamente los patógenos como virus y bacterias, así como las células humanas a las que infectan. La idea se basa en que resulta posible eliminar los patógenos de menor tamaño, como los virus, pero es más sensato emprender un combate defensivo contra los mayores, como los parásitos.

No obstante, Ruslan Medzhitov, inmunobiólogo de la Universidad de Yale, nunca ha aceptado que las alergias representen una reacción antiparasitaria equivocada. Según él, los parásitos y las sustancias que desencadenan las alergias (alérgenos) no tienen nada en común. En primer lugar, hay un número casi ilimitado de alérgenos. En segundo

CORTESÍA DE BRAD PETERSON, UNIVERSIDAD DE COLUMBIA E INSTITUTO PSIQUIÁTRICO DEL ESTADO DE NUEVA YORK

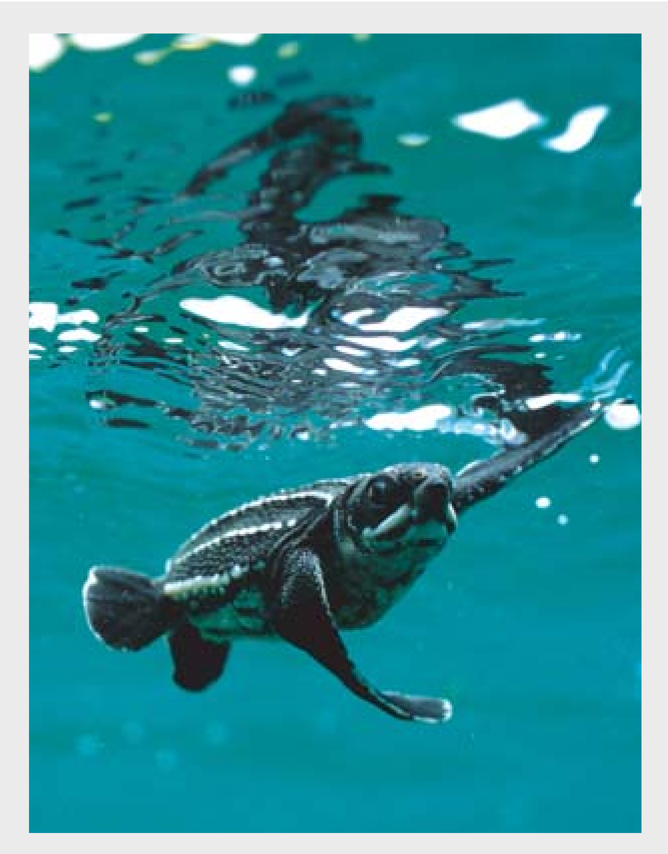
la zona occidental, mientras nadaban por el océano en busca de medusas. El estudio descubrió diferencias en las pautas migratorias de las dos poblaciones. Las tortugas del Pacífico occidental abandonan sus áreas de desove para alimentarse en el mar de China, los mares indonesios y el sudeste de Australia, así como a lo largo de la costa oeste de Estados Unidos, lo que las hace vulnerables ante las redes de pesca en numerosas zonas.

Las tortugas del Pacífico oriental viajan desde sus áreas de desove en México y Costa Rica hasta el Pacífico sudoriental, de manera que muchas quedan atrapadas en aparejos de pesca a lo largo de las costas sudamericanas. Como la población oriental ocupa un área geográfica más reducida, su riesgo de extinción resulta mayor, señala Bailey.

Los nuevos hallazgos podrían ayudar a los gestores a planificar vedas de pesca a corto plazo. Bailey afirma que una reciente decisión de cerrar todos los años una pesquería de peces espada y tiburones zorro en California, desde mediados de agosto hasta mediados de noviembre, redujo de forma drástica las capturas de tortugas laúd (en 2010 no se prendió ninguna). El rastreo mediante satélite puede ayudar a precisar el tiempo y el área de veda y a decidir las que deben realizarse junto a las costas de Oregón y Washington. En las islas Galápagos, las tortugas laúd atraviesan, de febrero a abril, un corredor migratorio muy bien delimitado, así que un cierre temporal de las pesquerías en esa zona podría terminar por completo con las capturas.

«Ya suponíamos que el problema residía en las pesquerías —señala Bailey—, pero ahora sabemos dónde concentrar nuestros esfuerzos.»

—Carrie Madren



Juvenil de tortuga laúd.

lugar, las respuestas alérgicas pueden producirse con extrema rapidez, en solo unos segundos; pero una respuesta a la presencia de parásitos no necesita tal inmediatez.

En un artículo publicado en abril en la revista *Nature*, Medzhitov y sus colaboradores afirman que las alergias aparecieron para protegernos de sustancias potencialmente tóxicas en el entorno o en la comida. En otras palabras, se desarrollaron evolutivamente por una razón concreta, no por simple error. ¿Cómo se defiende uno contra algo que inhala involuntariamente? Produciendo mocos, congestión nasal, estornudos y tos. O, si alcanza la piel, provocando un picor que induzca a rascarse, y con tal acción se elimine el intruso. Del mismo modo, si se ingiere una sustancia alergénica, el cuerpo puede reaccionar con vómitos.

Entre las pruebas citadas por Medzhitov se encuentra un estudio de 2006 publicado en la revista *Science*, que señalaba que las células clave implicadas en las respuestas alérgicas degradan e inactivan el veneno de las serpientes y de las abejas. Un estudio de 2010 aparecido en la revista *Journal of Clinical Investigation* sugiere que la respuesta alérgica a la saliva de las garrapatas evita que estos ácaros se adhieran al cuerpo y se alimenten de él.

¿Cómo concuerdan estos datos con el conocimiento preexistente sobre las alergias? Un estudio de 2011 publicado en *New England Journal of Medicine* demostró que los niños que crecían en granjas, donde estaban expuestos a numerosos microorganismos, tendían a sufrir menos asma y alergias. La idea, conocida como hipótesis de la higiene, sugiere que las personas que entran en contacto con multitud de bacterias y virus al comienzo de su vida invierten más recursos inmunitarios en respuestas de tipo 1 a costa de las reacciones de tipo 2. Medzhitov mantiene que tal teoría encaja con la suya.

En última instancia, la teoría de Medzhitov plantea más preguntas de las que consigue responder. Aun así, muchos concuerdan en que sus principios son verosímiles. «Nos estimula a elaborar nuevas hipótesis», señala Kari Nadeau, inmunólogo de la facultad de medicina de la Universidad Stanford.

—Melinda Wenner Moyer

MIKE PARRY, MINDEN PICTURES (*tortuga*); THOMAS FUCHS (*dibujo*)

MICROBIOLOGÍA

Los nuevos hongos criptomicota

La exploración molecular de la diversidad microbiana ha revelado la existencia de una nueva rama evolutiva de hongos con propiedades intermedias

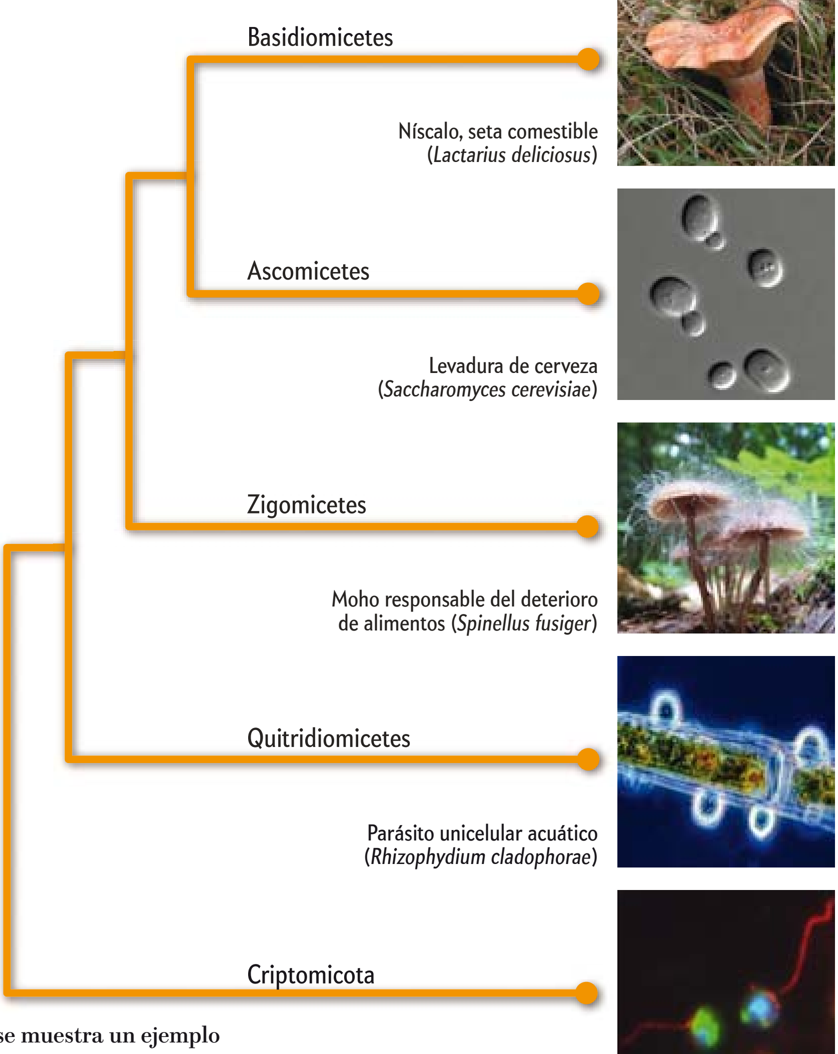
Los hongos nos acompañan desde tiempos inmemoriales en nuestra dieta y como agentes biotecnológicos. Es conocida la pasión buscadora de setas en algunas culturas claramente micófilas o la implicación de las levaduras en la producción de cerveza y pan. También nos han provocado molestias, participando en el deterioro de alimentos o causando enfermedades infecciosas. Los hongos se encuentran en todos los ecosistemas terrestres y acuáticos, donde desempeñan funciones ecológicas variadas: descomponen la materia muerta procedente de plantas y animales, establecen relaciones de simbiosis o parasitismo con otros organismos, etcétera. Los hongos conocidos abarcan una gran variedad taxonómica y de tamaños celulares, desde las levaduras de apenas algunos micrómetros, hasta las setas comestibles. Así pues, tratándose de un grupo de seres vivos tan presentes en nuestra sociedad, cabría pensar que su clasificación y el conocimiento de su diversidad se hallan ya bien establecidos. Nada más lejos de la realidad. Así lo han puesto de manifiesto los análisis de diversidad ambiental que hemos realizado mediante técnicas moleculares y cuyos resultados se publicaron en 2011 en *Nature*.

En las últimas décadas se ha realizado un esfuerzo notable para caracterizar la biodiversidad del planeta a partir de la secuenciación del ADN ambiental (ADN obtenido a partir de comunidades naturales). Estos esfuerzos se han dirigido sobre todo a los microorganismos, más difíciles de clasificar debido a que especies dispares comparten una morfología indistinguible. Hasta hace pocos años, los estudios sobre la biodiversidad microbiana se basaban en el aislamiento de los microorganismos en cultivo. Pero hoy sabemos que la gran mayoría de las especies no son fácilmente cultivables, lo que deja al margen de los estudios la mayor parte de la complejidad evolutiva de la vida.

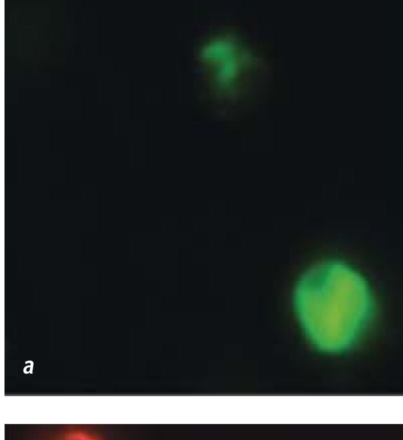
Estudios moleculares

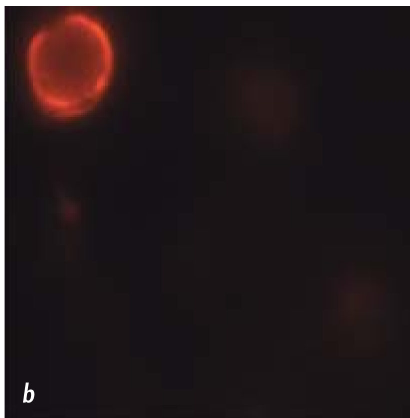
Para abordar el estudio de la diversidad microbiana de comunidades naturales, acometimos la secuenciación del gen que codifica el ARN de la subunidad pequeña del ribosoma. En varios lagos investigados, hallamos unas secuencias de este gen totalmente desconocidas. Al analizarlas y compararlas, emergió un nuevo grupo evolutivo de hongos con una diversidad equiparable a la ya descrita. Este grupo se bautizó como criptomicota («hongos ocultos» en griego), a la espera de una clasificación formal.

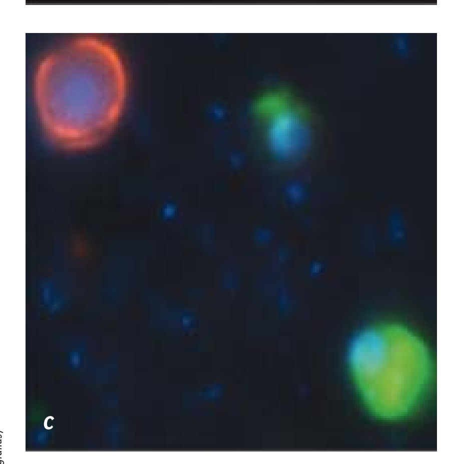
A partir de las secuencias de ADN ribosómico, diseñamos sondas fluorescentes para iluminar esas células por microscopía, mediante la técnica de hibridación fluorescente in situ (FISH, por sus siglas en inglés), basada en marcar los ribosomas de un grupo taxonómico concreto. Esta tinción específica reveló que los hongos criptomicota son organismos unicelulares muy pequeños, de tres a cin-



Árbol filogenético de los hongos, en el que se muestra un ejemplo emblemático para cada gran grupo. En la base, los nuevos hongos criptomicota en forma de células flageladas de vida libre.







Micrografías de un hongo criptomicota y un hongo unicelular clásico. En *a* se ha utilizado una técnica que tiñe solo la célula criptomicota (*verde*). En *b*, la tinción de quitina muestra solo la célula de un hongo típico, puesto que los hongos criptomicota carecen de esta sustancia (*rojo*). En *c*, la superposición de ambas imágenes.

CORTESÍA DE MEREDITH JONES, MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE LONDRES (*micrografías*)

co micrómetros, que presentan un ciclo biológico con varias fases: células de vida libre con flagelo (zoosporas) o sin flagelo (quistes), y células asociadas físicamente a otros microorganismos.

En ninguna de las fases se detectó la presencia de quitina, el componente fundamental de la pared celular de todos los hongos conocidos hasta la fecha. La quitina confiere rigidez a la pared celular, lo que permite a estos microorganismos colonizar ambientes hostiles, pero también les incapacita para la fagotrofia, la ingestión de partículas mediante la formación de vacuolas a partir de la membrana plasmática. En efecto, los hongos conocidos son osmótrofos y realizan una digestión externa de los alimentos para luego absorber las moléculas resultantes. Teniendo en cuenta la hipótesis de que el antepasado común de todos los eucariotas fue una forma unicelular fagótrofa, la ausencia de quitina en la pared celular de los hongos criptomicota sugeriría un estado intermedio en la evolución que finalmente derivó en los hongos conocidos.

Una nueva clasificación

El descubrimiento de los hongos criptomicota ejemplifica lo mucho que nos queda por saber sobre la diversidad taxonómica y funcional de los microorganismos, incluso dentro de grupos que se creían bien descritos. De hecho, este nuevo grupo duplica la diversidad fúngica conocida. Esta gran diversidad genética, junto con su prevalencia en distintos sistemas naturales, hace pensar que puedan desempeñar un papel importante, aunque todavía desconocido, dentro de los procesos ambientales.

Su posición basal en el árbol filogenético de los hongos ofrece algunas claves para entender la historia evolutiva de este grupo tan complejo y encierra el potencial para revelar el modo en que los hongos evolucionaron y se diferenciaron de otras formas de vida. Los hongos criptomicota son microorganismos de vida libre, con células desnudas y sin quitina, más parecidos a eucariotas unicelulares que basan su alimentación en fagotrofia, no en osmotrofia. Sin duda representan un grupo de estudio atractivo con intrigantes historias evolutivas y ecológicas por descubrir.

—*Ramon Massana*
Instituto de Ciencias del Mar, CSIC
Barcelona

MODELOS MATEMÁTICOS

Sistemas complejos y el Tribunal Supremo de Estados Unidos

Un algoritmo basado en la red de relaciones internas entre los miembros del tribunal predice sus decisiones con más acierto que los expertos legales conocedores del caso

¿Es posible diseñar algoritmos matemáticos capaces de predecir las decisiones que tomamos los seres humanos? La pregunta puede parecer puramente académica, o incluso más propia de la saga *La Fundación*, de Isaac Asimov, que de un proyecto científico. Pero tales algoritmos no solo existen, sino que desempeñan una función cada vez más importante en nuestro quehacer diario. Los empleamos, por ejemplo, cuando una página web nos recomienda libros a partir de los que ya hemos comprado, o películas a raíz de cómo hemos evaluado estrenos anteriores.

Dado que puede predecirse qué películas serán de nuestro agrado y cuáles no, ¿sería posible aventurar el fallo de una sentencia judicial? Al fin y al cabo, desde el punto de vista matemático, estos dos problemas resultan bastante similares. Desde 2002, un proyecto multidisciplinar (Supreme Court Forecasting Project) en el que participan expertos de varias universidades de EE.UU. intenta responder a esta pregunta para el caso particular del Tribunal Supremo de Estados Unidos. Los investigadores han constatado que, cuando se conoce el contenido del caso, un grupo de expertos legales puede predecir con una tasa de acierto del 68 por ciento las decisiones de cada uno de los magistrados. También se han creado algoritmos que, teniendo en cuenta el contenido y la historia de un caso, aciertan el fallo judicial en un 67 por ciento de las ocasiones.

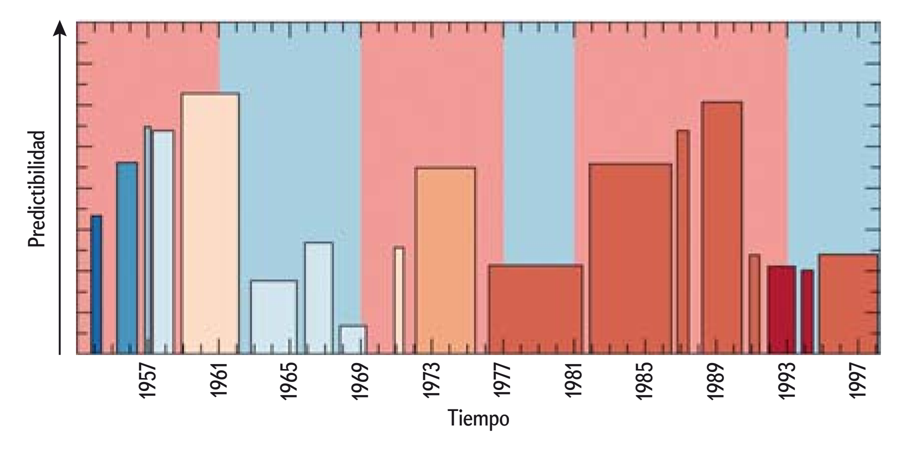
Sin embargo, tales enfoques ignoran la dimensión social y psicológica del proceso jurídico. El Tribunal Supremo de Estados Unidos se compone de nueve magistrados que, a propuesta del presidente del país, permanecen en el cargo de forma vitalicia. Cabe pensar que, por cuestiones ideológicas, de edad o personales, un juez sentirá una afinidad mayor hacia algunos compañeros que hacia otros. Por tanto, debería ser posible utilizar los votos de algunos de los magistrados para predecir el comportamiento de los demás.

Según hemos demostrado en un artículo publicado en la revista *PLoS ONE*, si conocemos el historial de resoluciones del tribunal y el voto de ocho de sus magistrados, podemos predecir el del noveno con una tasa de acierto del 83 por ciento. Es decir, mejor que los expertos que conocen el contenido legal del caso. Nuestro resultado implica que es más fácil saber qué votará un juez a partir de lo que han dictaminado sus compañeros que a partir de un conocimiento detallado de la ley y las particularidades del caso.

El algoritmo que utilizamos para predecir los votos no es sencillo. Sabemos que jueces y casos pueden organizarse en «bloques», pero la selección del modelo matemático más adecuado para describir estas agrupaciones no resulta inmediata. Por ejemplo, los modelos que suponen que los jueces actúan en una sola dimensión progresista-conservador (o izquierda-derecha) cuentan con muy poco poder predictivo. En última instancia, el algoritmo ha de evaluar multitud de agrupaciones plausibles de jueces y casos, de la misma manera —literalmente— que un físico computacional deduce las propiedades de un gas a partir de las posiciones y velocidades posibles de los átomos que lo componen.

Las analogías entre sistemas sociales (en este caso, un tribunal) y modelos físicos (como un gas) constituyen hoy en día uno de los pilares en el estudio de los sistemas complejos. Estos se caracterizan por el hecho de que los elementos que los componen se hallan conectados por medio de intrincadas redes de interacciones, de manera que el estudio matemático y estadístico de dichas redes nos permite entender el funcionamiento y la evolución del sistema.

En cuanto a las aplicaciones de este enfoque, podemos mencionar el estudio de dianas prometedoras para nuevos fármacos a partir de las interacciones exis-



Demócratas y republicanos: Cada barra se corresponde con una composición determinada del Tribunal Supremo de EE.UU., cuyos miembros son nombrados a propuesta del presidente de la nación. La altura refleja en cada caso la predictibilidad del comportamiento de los jueces, según un modelo matemático que predice el voto de uno de ellos a partir del historial de resoluciones del tribunal y el voto de sus compañeros; la anchura indica durante cuánto tiempo se prolongó el tribunal. El color de fondo se corresponde con el partido gobernante en ese momento (*azul, presidencia demócrata; rojo, republicana*); el color de las barras indica la composición del tribunal (*hacia el azul, mayoría de miembros de designación demócrata; hacia el rojo, mayoría republicana*). No se aprecian indicios de que la composición del tribunal afecte a la predictibilidad; sin embargo, esta resulta significativamente mayor durante los períodos de mandato republicano.

DE: «JUSTICE BLOCKS AND PREDICTABILITY OF U.S. SUPREME COURT VOTES», POR R. GUIMERÀ Y M. SALES-PARDO: *PLOS ONE*, VOL. 6, N.º 11, NOVIEMBRE DE 2011

tentes entre reacciones químicas o proteínas, los análisis que intentan determinar qué especies desempeñan un papel más importante en la estabilidad global de un ecosistema o la identificación de los puntos más frágiles de un sistema económico. En el caso de los sistemas sociales, aún no hemos alcanzado los niveles de la psicohistoria imaginada por Asimov. Sin embargo, va tomando forma lo que algunos han dado en llamar *cliodinámica*: el estudio de los procesos históricos mediante modelos matemáticos.

En cualquier caso, nuestro estudio deja aún varias preguntas sin resolver. ¿Por qué resulta más sencillo predecir el voto de los magistrados cuando el presidente de EE.UU. es republicano? ¿A qué se debe que cada vez sea más difícil acertar las decisiones del Tribunal Supremo? Al menos, ahora ya conocemos el modo de formular estas y otras preguntas de manera cuantitativa. Puede que en unos años hallemos la respuesta.

—Roger Guimerà (ICREA)
—Marta Sales-Pardo
Departamento de ingeniería química
Universidad Rovira i Virgili
Tarragona

QUÍMICA CUÁNTICA

Hacia una nueva química

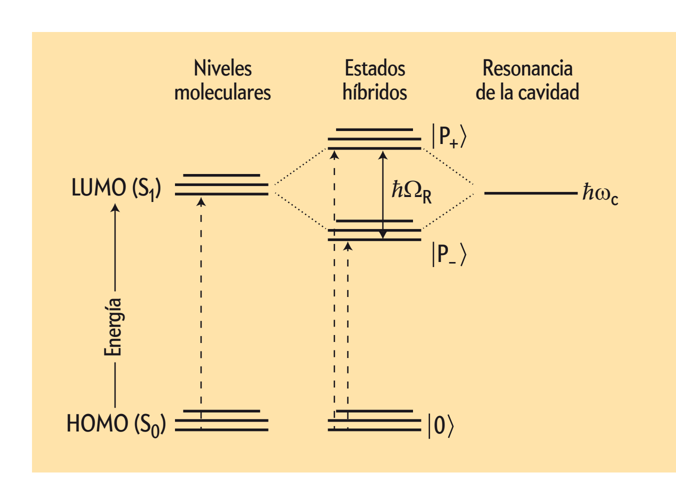
La existencia de un fuerte acoplamiento entre campos electromagnéticos y estados moleculares excitados plantea una nueva estrategia para controlar estados cuánticos y la dinámica de reacciones químicas

La interacción entre las ondas electromagnéticas y la materia ha fascinado a los científicos durante siglos. Sus efectos son incontables y abarcan fenómenos tan sorprendentes como el láser. Algunas de estas interacciones no necesitan la presencia de luz para producirse; les bastan las fluctuaciones del campo electromagnético. Pensemos en las fuerzas de Van der Waals, en la escala de los enlaces químicos, o las de Casimir, en la escala macroscópica. En fecha reciente, se ha descubierto otro de estos fenómenos: Thomas Ebbesen, de la Universidad de Estrasburgo, y su equipo han demostrado en dos trabajos seminales que el acoplamiento ultrafuerte entre moléculas y los modos cuánticos electromagnéticos de una cavidad altera los estados de las moléculas. Estos hallazgos, publicados en *Physical Review Letters* (2011) y en la edición internacional de *Angewandte Chemie* (2012), abren nuevas vías para el control de las propiedades ópticas y electrónicas de entidades cuánticas.

El avance de la nanotecnología ha resucitado el interés por las interacciones entre la materia y la luz confinada en espacios de dimensiones nanométricas. Se sabe que cuando se colocan moléculas u otros emisores cuánticos en una superficie plasmónica o en una cavidad óptica, ocurren cambios en la respuesta óptica de las moléculas que resultan en la desaparición o la potenciación de las propiedades ópticas. En algunos casos, la cavidad o el plasmón operan a modo de concentrador de las ondas electromagnéticas, lo que desemboca en respuestas locales intensas y casi siempre no lineales del material. Así es como se obtiene un incremento de varios órdenes de magnitud en la dispersión Raman.

Sin embargo, en todos esos casos, el acoplamiento que se produce entre los materiales y el campo electromagnético es débil, ya que no se crea ningún modo óptico. Un acoplamiento se considera fuerte cuando conlleva la formación de nuevos estados cuánticos. Por ejemplo, cuando se sitúan emisores cuánticos en una cavidad fotónica, estos interaccionan con ella a través de un intercambio reversible de fotones, que se manifiesta en la separación de Rabi de los estados cuánticos. La magnitud de esta separación (*splitting*) depende del parámetro de acoplamiento y del ancho de línea de la cavidad y del emisor. El acoplamiento fuerte se ha observado en sistemas atómicos y de estado sólido, así como en materiales orgánicos. Los estados generados presentan numerosas propiedades que los hacen ideales para la fabricación de sensores y otras aplicaciones. Ello ocurre en el caso de las resonancias Fano, una forma de acoplamiento fuerte que puede inducirse mediante sistemas plasmónicos. Dado que muestran una notable variación con el índice de refracción del medio, resultan ideales para sensores.

Estudios teóricos recientes han demostrado que cuando la separación de Rabi supera en un 15 por ciento la transición total, aparece un nuevo régimen: el acoplamiento ultrafuerte. Este tipo de interacción presenta numerosas propiedades interesantes que abarcan desde la generación de fotones correlacionados hasta la formación de condensados de Bose-Einstein a temperatura ambiente. El acoplamiento ultrafuerte se ha observado solo en un número reducido de experimentos de estado sólido. Ello se debe a la ausencia de transiciones ópticas con un dipolo suficientemente grande para acoplarse con el campo óptico (condición necesaria para la observación del fenómeno). No obstante, el grupo de Ebbesen ha demos-



Separación de Rabi de los niveles energéticos moleculares. El esquema muestra la interacción de una transición entre orbitales HOMO-LUMO (S_0-S_1) de una molécula resonante con el modo de la cavidad $\hbar\omega_c$, donde ω_c corresponde a la frecuencia de oscilación resonante de la cavidad. El acoplamiento fuerte resulta en la formación de dos estados híbridos luz-materia (polaritónicos), separados por la energía de Rabi $\hbar\omega_R$.

FIGURAS ADAPTADAS DE HUTCHISON ET AL. EN *ANGEWANDTE CHEMIE INTERNATIONAL EDITION*, VOL. 51, PÁGS. 1592-1596, 2012

Acoplamiento ultrafuerte. Arriba se ilustra la conversión fotocrómica entre merocianina (MC) y espiropirano (SP) en una cavidad fotónica. Abajo, el espectro de transmisión del sistema acoplado formado por la cavidad y las moléculas fotocrómicas (para obtener el espectro de transmisión se ilumina la muestra con luz de diferentes longitudes de onda y se mide el porcentaje de fotones que llegan a atravesar la muestra; las zonas donde la transmisión es elevada denotan picos de absorción). La primera señal (*negro*) corresponde a las moléculas de SP; al no hallarse en resonancia con la cavidad, no se produce acoplamiento ni, por tanto, aparecen nuevas bandas de energía. Cuando se exponen a luz monocromática de 330 nanómetros, se convierten en moléculas de MC, que entran en resonancia con la cavidad. Conforme aumenta la concentración de MC, se observa una transición de acoplamiento débil (*por ejemplo, azul claro*) a acoplamiento fuerte (*lila*) y, por fin, a ultrafuerte (*fucsia*). Cabe resaltar que la separación entre las dos bandas nuevas aumenta con el tiempo de irradiación, es decir, con la concentración de MC.

trado que los compuestos fotocrómicos (que cambian de color al ser iluminados), al poseer enormes elementos de matriz dipolo-transición (la matriz que se utiliza para calcular las probabilidades de transición entre estados), llenan esta «brecha»; proporcionan el ingrediente central para obtener un acoplamiento ultrafuerte entre moléculas y cavidades ópticas, plasmones o ambos. Los sistemas estudiados muestran una separación de los estados moleculares de unos 700 milielectronvoltios, un 32 por ciento de la transición óptica implicada.

Los dispositivos usados para el experimento exhiben una simplicidad notable. En un caso, una cavidad óptica compuesta de espejos de plata con un factor de calidad (capacidad para almacenar energía electromagnética) de solo 10; en el otro, una superficie de plata con propiedades plasmónicas. Ambos están cubiertos por una capa delgada de metacrilato que contiene moléculas de espiropirano (SP), un compuesto fotocrómico. Los experimentos son extremadamente elegantes: las moléculas de SP no se hallan en resonancia con la cavidad óptica o los plasmones, pero sí entran en resonancia cuando se convierten en merocianina (MC), su fotoisómero. Ello permite un gran control interno del sistema.

En general, cuando se produce un acoplamiento, las propiedades de una unidad óptica son independientes de las de otras unidades presentes en la misma cavidad o superficie. Por tanto, los fenómenos derivados del acoplamiento no varían con el número o densidad de emisores. Sin embargo, cuando el acoplamiento fuerte se produce entre los modos ópticos y un gran número de unidades ópticas, el comportamiento es otro bien distinto: en este caso, la fuerza del acoplamiento depende de la raíz cuadrada de la concentración de estas unidades.

La propuesta de Ebbesen y su equipo demuestra ese punto clave. En el estado inicial, las transiciones ópticas de las moléculas SP no se hallan en resonancia. Conforme aumenta la concentración de moléculas MC mediante la fotoconversion, el acoplamiento pasa de débil a fuerte y, luego, a ultrafuerte. Ello se ve reflejado en la separación entre los orbitales moleculares HOMO (el más energético de los ocupados) y LUMO (el menos energético de los desocupados), que depende de la concentración de MC.

El hallazgo entraña consecuencias de gran trascendencia para la química, centradas en la posibilidad de generar nuevos estados moleculares mediante este método. El acoplamiento fuerte de las moléculas con la cavidad permite controlar, sin ir más lejos, la velocidad de una reacción: la cinética de conversión entre los estados SP y MC cambia cuando las moléculas se hallan en resonancia con la cavidad. En el futuro, estos nuevos estados podrían aplicarse a la fotocatálisis o los sensores. Y eso no es todo. Esta investigación plantea también cuestiones de gran interés: puesto que estos estados son altamente cooperativos entre muchas moléculas, ¿cuáles serían las propiedades de transporte a través de estos estados? ¿Guardan semejanza con los estados de banda? En caso negativo, ¿cuáles son las diferencias? ¿Cuál es la naturaleza del acoplamiento entre los estados separados?

Por fin, el equipo de Ebbesen subraya en uno de sus trabajos (*Angewandte*) un fenómeno intrigante: también el acoplamiento ultrafuerte existe en ausencia de luz y puede ocurrir solo como consecuencia de las fluctuaciones del campo electromagnético. Ello sugiere un vínculo entre el acoplamiento ultrafuerte y las fuerzas de Casimir y de Van der Waals. ¿Ejercen esas moléculas una fuerza en la cavidad solo por estar ahí? Y si es así, ¿se trata de otra forma de fuerza de Casimir, una resonante?

—Anna Fontcuberta i Morral
y Francesco Stellacci
Instituto de Materiales
Escuela Politécnica Federal de Lausana

Artículo original publicado en *Nature Materials*, vol. 11, págs. 272-273, abril de 2012.

PALEONTOLOGÍA

Los dinosaurios de la cuenca de Cameros

Las huellas del Cretácico halladas en esta extensa región desvelan uno de los misterios más intrigantes: ¿qué hacían y hacia dónde se dirigían los dinosaurios que habitaron allí?

La cuenca de Cameros es especialmente relevante y conocida por sus yacimientos de icnitas (huellas) de dinosaurios. Los primeros hallazgos, a comienzos de los años setenta del siglo xx, causaron una enorme sensación entre las gentes del lugar. Hoy en día, después de más de 40 años, el número de estos impresionantes museos al aire libre supera con creces el centenar, y casi cada año se descubren nuevos puntos de interés. La región está situada en el sector más septentrional de la cordillera Ibérica y comprende zonas de las provincias de La Rioja, Burgos y Soria. Su extensión abarca unos 6000 kilómetros cuadrados. [*Véase* «Los dinosaurios también nadaban», por R. Ezquerra Miguel, L. Costeur y F. Pérez Lorente; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010.]

¿Por qué existen tantos yacimientos de huellas de dinosaurios en la cuenca de Cameros? Durante gran parte del Mesozoico toda la zona ibérica constituyó un inmenso valle de rift (parecido a la región donde se encuentran actualmente los grandes lagos africanos), del que formaba parte Cameros. Esas condiciones favorecieron una gran acumulación de sedimentos. El proceso de sedimentación fue muy dilatado en el tiempo: duró unos 43 millones de años, desde finales del Jurásico hasta bien entrado el Cretácico. En esa época predominó un ambiente lacustre, netamente continental y con un régimen de baja energía, es decir, de aguas muy tranquilas. Durante largos períodos de tiempo quedaron expuestas grandes extensiones de sedimento listo para ser pisado. Posteriormente, las capas expuestas quedaron sepultadas por nuevos aportes que preservaron las icnitas subyacentes.

Las huellas de los dinosaurios se hallan por doquier. Sus miles de ejemplares son testimonio de una intensa actividad animal a comienzos del Cretácico, en unas condiciones ecológicas diferentes a las actuales en cuanto a latitud, paisaje, situación geográfica, fauna, flora y clima. Este era más estable, aunque con ciertas variaciones estacionales, y también más cálido y húmedo que hoy en día. Además, la diferente situación relativa de las masas continentales daba lugar al desarrollo de ecosistemas totalmente distintos de los actuales. Si bien es cierto que las huellas de los dinosaurios constituyen el registro más sobresaliente de Cameros, en algunos yacimientos se pueden observar también icnitas de tortugas, cocodrilos, aves y, sobre todo, pterosaurios.

¿Qué hacían en la región todos esos animales? ¿Era Cameros su hábitat natural o simplemente constituía una zona de paso? Tras el análisis direccional de más de un millar de rastros producidos por aquellos dinosaurios, cuyos resultados se han publicado en *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* en 2010, creemos hallarnos en condiciones de dar una respuesta a estas cuestiones.

El primer lago: Formación Huérteles

Nuestra historia comienza hace unos 143 millones de años. Durante el primer período del Cretácico, el Berriasiense, se instaló en la actual provincia de Soria un gran lago salino rodeado por una llanura sedimentaria con pequeños canales fluviales que desembocaban en él. Hoy todos esos materiales sedimentarios constituyen la Formación Huérteles.

Los sedimentos que se acumularon en el interior del lago, formados en la actualidad por calizas tableadas, no han proporcionado hasta la fecha fósil alguno. Por el contrario, son las facies de alrededor las que contienen icnitas y otros tipos de fósiles que suelen acompañarlas. Esos sedimentos circundantes están formados por areniscas de grano fino, lutitas y margas, y fueron intensamente pisados por los dinosaurios, lo que produjo una gran cantidad de rastros. Si analizamos las direcciones de movimiento que estos reflejan, observamos cierta dispersión pero también una ligera tendencia a la bidireccionalidad, con una orientación mayoritaria paralela a las orillas del lago. Se trata de un resultado esperable en términos estadísticos y, de hecho, se ha observado con cierta frecuencia en otras formaciones lacustres conocidas. En efecto, se ha comprobado que los animales tienden a moverse preferentemente en paralelo a la línea de agua (cauce de un río o línea de costa marina o lacustre).

Pero lo más peculiar de la Formación Huérteles es la total ausencia de icnitas en las cercanías y el interior de las calizas lacustres, algo que no suele observarse en otros lagos. ¿A qué se debe? Quizás a una preservación diferencial entre las facies circundantes y las calizas del lago, o bien simplemente al hecho de que sus aguas no eran idóneas para beber, con lo que los animales no se acercaban a él.

El segundo lago: Grupo Enciso

Con el tiempo, el paisaje lacustre del Berriasiense cambió y terminó por desaparecer. En su lugar, y durante muchos millones de años, se instauró un régimen predominantemente fluvial que apenas dio lugar a icnitas de dinosaurios. Los sedimentos procedentes de ese dilatado episodio se conocen como Grupo Urbión; comprenden los períodos cretácicos desde el Valanginiense hasta el Barremiense (hace entre 140 y 125 millones de años).

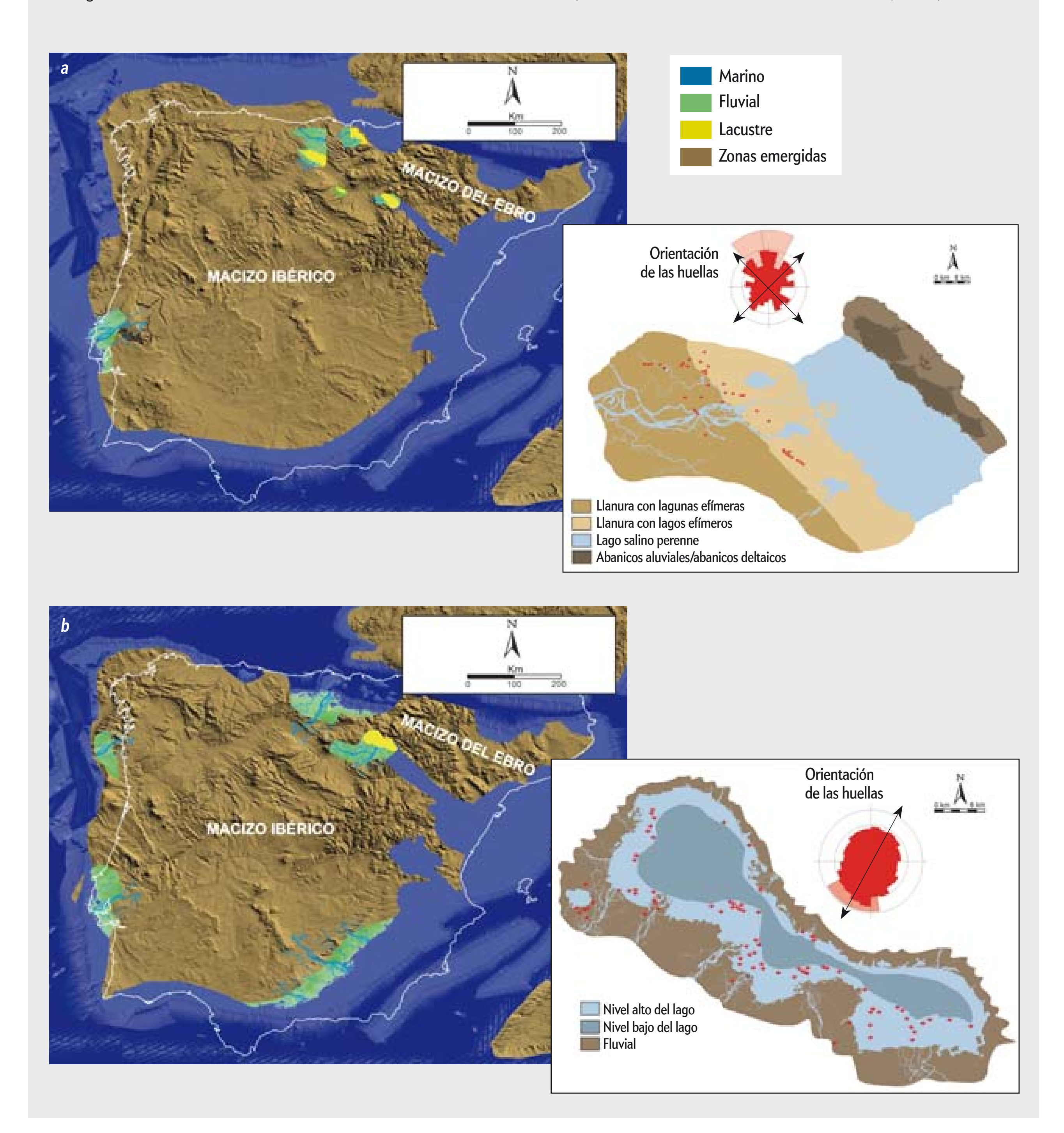
Al final de ese gran intervalo, el dominio fluvial también se disipó y, durante el Aptiense inferior (hace unos 123 millones de años), se formó de nuevo en el lugar una gran cuenca lacustre, con un enorme lago de aguas someras. Las características de ese ambiente fueron completamente diferentes a las del lago del Berriasiense. Gran parte de la cuenca de Cameros se había convertido en una área deprimida y alargada en sentido noroeste-sureste, de unos 70 kilómetros de longitud, limitada en la parte septentrional por un relieve ligeramente elevado. Desde el sursuroeste, pequeños arroyos y cauces fluviales aportaban sedimentos al lago y formaban, en ciertas zonas, pequeños deltas lacustres, en muchos de los cuales se produjo una intensa actividad animal. Ello dio lugar a grandes y extensos yacimientos de icnitas de dinosaurios.

El conjunto de rocas que se formaron en ese tiempo se conoce como Grupo Enciso. Se trata de paquetes sedimentarios carbonatados que pueden seguirse durante kilómetros a lo largo de gran parte de la cuenca. Sus características litológicas, su aspecto nodular y las señales de desecación indican que a menudo quedaban expuestos a la intemperie,

INTERPRETACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE LAS HUELLAS

A lo largo del Cretácico, la placa Ibérica experimentó una serie de cambios que determinaron la distribución relativa de las diferentes áreas continentales y ambientes. Ello repercutió en el paisaje y en las comunidades biológicas que habitaron en la cuenca de Cameros. A comienzos de ese período, en el Berriasiense (*a*), se instauró en la región soriana un lago hipersalino, limitado al noreste por una serie de abanicos aluviales, y al suroeste, por una llanura dominada por lutitas y arenas de grano fino con pequeñas charcas más o menos efímeras. Esa llanura estuvo frecuentada por diversos tipos de dinosaurios que produjeron abundantes huellas, aunque solo fuera del lago. El análisis de la dirección de los rastros muestra una amplia dispersión, con un leve predominio de la orientación paralela a los márgenes del lago (*inserto*).

Durante el Aptiense (Cretácico inferior) (*b*), la doble invasión marina desde el Atlántico y desde el mar de Tethys hizo de Cameros la única zona continental que conectaba el macizo Ibérico y el macizo del Ebro, lo que la convirtió en un lugar de paso casi obligado. Durante ese período, se extendía en Cameros un gran lago somero cuyas variaciones del nivel del agua permitieron a los dinosaurios atravesarlo sin complicaciones. Ello se deduce del gran número de huellas descubiertas; la mayoría de ellas se adentran en el lago y presentan orientación NNE-SSO, de acuerdo con el avance de los dinosaurios (*inserto*).



aunque durante cortos períodos de tiempo. De ello se deduce que los materiales se acumularon en un régimen general de baja energía, dentro de un vasto sistema lacustre carbonatado, con desarrollo ocasional de algunas áreas palustres, algo común en los lagos extensos de carácter somero. En tales condiciones, y dada la abundancia, tamaño y capacidad de movimiento de los dinosaurios, se produjeron numerosas huellas, muchas de las cuales pasaron a formar parte del registro fósil.

A diferencia de lo que describimos para los yacimientos de la Formación Huérteles, los yacimientos riojanos del Grupo Enciso se hallan situados en el interior de la cuenca lacustre, es decir, dentro del lago, y parecen distribuirse a través de todo el complejo. ¿Cómo es posible tal circunstancia? La explicación radica en que el lago constituía una extensa área de aguas muy poco profundas que sufría fluctuaciones de nivel, con lo que afloraban grandes extensiones de terreno que permitían el paso de los animales. Este fenómeno resulta habitual en ciertos lagos actuales, como en el lago Chad, donde un descenso de tres metros en el nivel del agua aleja la orilla unos 18 kilómetros. En Cameros, que carecía de un relieve elevado, tales episodios habrían favorecido el paso de los animales a través de todo el complejo lacustre. A pesar de ello, parece que el lago nunca llegó a desecarse por completo, ya que no existe ningún registro al respecto.

Lugar de paso

¿Qué hacían y hacia dónde iban tantos dinosaurios? Para averiguarlo, deben tenerse en cuenta las condiciones paleoambientales y geográficas de la placa Ibérica, así como su evolución en el tiempo. Durante el Aptiense, las características tectónicas de la cuenca de Cameros, junto con una subida generalizada del nivel del mar, provocaron una trasgresión marina (invasión del mar en una zona continental) que tuvo dos frentes. El primero se produjo desde el norte, con la inundación de gran parte de la cuenca Vasco-Cantábrica; el segundo, desde el sureste, con la invasión del mar de Tethys (el protomediterráneo) hacia gran parte de la cordillera Ibérica. Como consecuencia de esa trasgresión marina, la placa Ibérica se dividió en dos grandes áreas continentales emergidas: por un lado, el macizo del Ebro al noreste y, por otro, el macizo Ibérico al sudoeste, separados por el mar y comunicados únicamente por la cuenca de Cameros, es decir, por el sistema lacustre del Grupo Enciso.



Huellas de dinosaurios terópodos en el yacimiento de Los Cayos A (Cornago, La Rioja). La escala mide 80 centímetros.

JOAQUÍN MORATALLA

¿Qué ocurrió entonces? Durante esa época (Aptiense inferior), Cameros constituyó la única ruta posible que los grandes vertebrados podían emprender para pasar de un área geográfica a otra, a través de un corredor cuya anchura mínima se estima en unos 100 kilómetros. Después de analizar las direcciones de movimiento de casi un millar de rastros, hemos constatado que existe una clara tendencia bidireccional de todo el conjunto, en sentido nornoreste-sursuroeste, para todos los tipos de dinosaurios.

Esa distribución parece influida por las condiciones paleogeográficas descritas. Puede que, para algunos grupos de vertebrados, esa cuenca constituyera su hábitat natural, pero para otros, en especial los grandes dinosaurios como los terópodos, Cameros fue un mero lugar de paso. Sus movimientos coinciden, en líneas generales, con la orientación de la conexión aptiense entre el macizo del Ebro y el macizo Ibérico.

Sorprende que la mayoría de las huellas (el 85 por ciento, en promedio), tanto las de la Formación Huérteles como las del Grupo Enciso, pertenezcan a dinosaurios terópodos, que eran carnívoros. Esa proporción carece de sentido desde el punto de vista ecológico ya que, en cualquier comunidad biológica, el número de depredadores nunca puede superar al de presas. Por consiguiente, ese dato debe obedecer a algún tipo de sesgo. Tal vez los terópodos fueron mucho más activos que los fitófagos y se moviesen según un patrón de búsqueda y caza. Ello daría lugar a una mayor formación y conservación de las huellas de carnívoros. Los fitófagos, por el contrario, quizás exhibieran una menor actividad, o bien habitaran zonas más amplias o alejadas del gran complejo lacustre, lo que habría originado un menor número de rastros.

Una vez más, las huellas de los dinosaurios han permitido ahondar en nuestro conocimiento sobre la singular cuenca de Cameros y han arrojado nueva luz sobre las comunidades biológicas, el paisaje, el clima y la geografía de la placa Ibérica durante el Cretácico, uno de los capítulos más fascinantes de la historia de la vida y de nuestro planeta.

—Joaquín Moratalla
Museo Geominero
Instituto Geológico y Minero de España

—Javier Hernán
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid

Martine Bosman investiga en el Instituto de Física de Altas Energías de Barcelona y es presidenta del consejo de colaboración del experimento ATLAS del LHC.
Teresa Rodrigo investiga en el Instituto de Física de Cantabria y en el experimento CMS, del cual también preside el consejo de colaboración.

ALTAS ENERGÍAS

La búsqueda del bosón de Higgs

Los experimentos CMS y ATLAS del Gran Colisionador de Hadrones han anunciado el descubrimiento de una nueva partícula que podría ser el bosón de Higgs. ¿Cómo se ha llegado hasta aquí?

Martine Bosman y Teresa Rodrigo

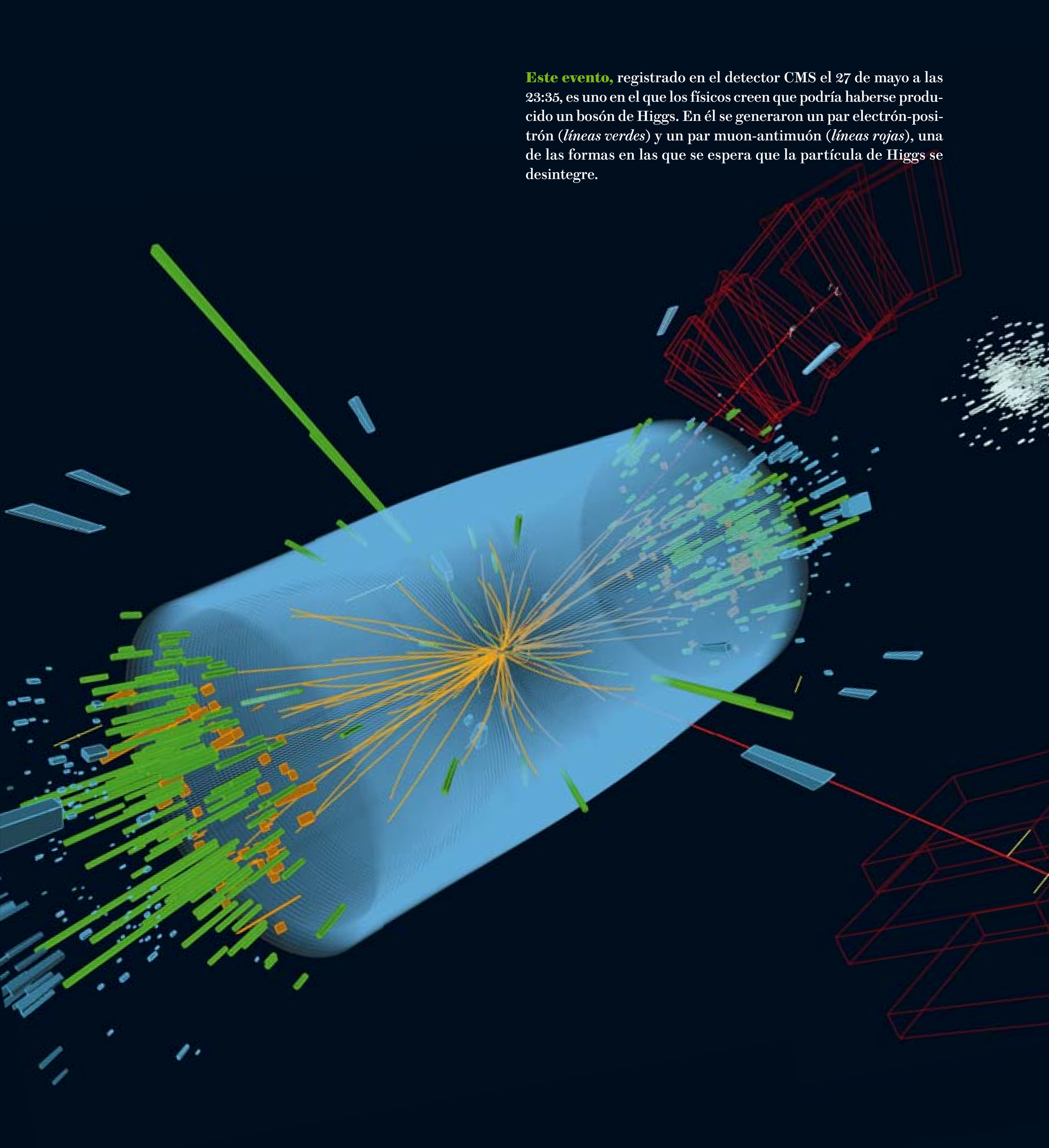
El pasado 4 de julio, en el auditorio del CERN se respiraba el ambiente de los grandes días: la organización había convocado para aquella mañana un seminario en el que se harían públicos los últimos resultados relativos a la búsqueda del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Tanta era la expectación que, para no perderse el acontecimiento, algunos de los asistentes habían pasado la noche frente a la sala de conferencias. Poco después, los portavoces de las colaboraciones CMS y ATLAS, Joe Incandela y Fabiola Gianotti, anunciaban que sus respectivos experimentos habían descubierto una nueva partícula subatómica.

Tras la presentación de los resultados, Rolf Heuer, director del CERN, tomó la palabra y exclamó: «Como profano, diría: ¡Creo que lo tenemos! Se trata sin duda de un hito histórico, pero al mismo tiempo es solo el principio. Aún nos queda mucho por delante». El auditorio estalló en un larguísimo aplauso y se puso en pie.

La cuenta atrás para la presentación de los resultados había comenzado muy poco antes: el 19 de junio. Ese día se registraron en el LHC las últimas colisiones entre protones antes de iniciar una corta parada técnica. Con ello se completaba la muestra de datos que debían analizarse de cara al congreso mundial más importante en física de partículas, la Conferencia Internacional en Física de Altas Energías (ICHEP), la cual iba a celebrarse en Melbourne entre el 4 y el 11 de julio. Ambas colaboraciones comenzamos entonces nuestra particular carrera para analizar la mayor cantidad posible de datos y alcanzar la máxima sensibilidad en la búsqueda del ansiado bosón de Higgs.

Los físicos llevan décadas invirtiendo cantidades enormes de ingenio y recursos en esa búsqueda. Ello se debe a que el bosón de Higgs no es una partícula más: desempeña un papel muy destacado en nuestra concepción de las leyes más profundas de la naturaleza. Todo lo que sabemos sobre el mundo subatómico queda englobado en el modelo estándar, una teoría que describe con una precisión extraordinaria las propiedades de todas las partículas elementales conocidas y la manera en que estas interaccionan entre sí. Sin embargo, existe una cuestión fundamental para la que el modelo estándar no encuentra fácil respuesta: ¿por qué las partículas elementales poseen masa? La pregunta surge porque, en principio, las ecuaciones básicas que describen las interacciones entre partículas nos dicen que estas deberían carecer de masa. Pero, si así fuese, el universo mostraría un aspecto completamente distinto del que conocemos. No habría átomos ni materia ordinaria y, por supuesto, no existiríamos.

Es aquí donde interviene el mecanismo de Higgs. La idea consiste en postular la existencia de un «medio» omnipresente en el universo: el campo de Higgs. Al interaccionar con di-



Este evento, registrado en el detector CMS el 27 de mayo a las 23:35, es uno en el que los físicos creen que podría haberse producido un bosón de Higgs. En él se generaron un par electrón-positrón (*líneas verdes*) y un par muon-antimuón (*líneas rojas*), una de las formas en las que se espera que la partícula de Higgs se desintegre.

EN SÍNTESIS

Propuesto en los años sesenta, el mecanismo de Higgs da respuesta a una pregunta nada obvia: ¿por qué las partículas elementales tienen masa?

De dicho mecanismo puede deducirse la existencia de un bosón masivo jamás observado hasta ahora. Los físicos llevan decenios intentando dar con él.

En fecha reciente, dos experimentos del LHC del CERN han referido el descubrimiento de una nueva partícula que bien podría ser el bosón de Higgs.

En este artículo se explica la larga carrera experimental y el delicado proceso de análisis de datos que han hecho posible ese descubrimiento.

cho medio, las partículas adquieren masa como resultado de la fricción que se genera. Esta explicación del origen de la masa fue propuesta por primera vez en 1964 por Robert Brout y François Englert y, muy poco después, también por Peter Higgs. Este último señaló, además, que dicho mecanismo implicaba la existencia de una nueva partícula elemental, también dotada de masa: lo que hoy conocemos como bosón de Higgs. Este se correspondería con las excitaciones fundamentales de ese campo ubicuo, del mismo modo en que los fotones (las partículas que componen la luz) se corresponden con las excitaciones fundamentales del campo electromagnético. Con el tiempo, el bosón de Higgs se ha convertido en la partícula más buscada por los físicos [*véase* «Un abanico de partículas», por J. Bernstein, *en este mismo número*].

EQUIPO PARA UN LARGO VIAJE

¿Qué necesitamos para poner de manifiesto la existencia del bosón de Higgs? En primer lugar, un colisionador de partículas. En el LHC se aceleran haces de protones a velocidades muy próximas a la de la luz y se hacen circular en sentidos opuestos hasta que chocan entre sí. La teoría nos dice que, si el bosón de Higgs existe, debería producirse en algunas de esas colisiones de alta energía. No obstante, la probabilidad de que ello ocurra resulta extremadamente baja: para los experimentos que ha estado llevando a cabo el LHC, puede estimarse que hacen falta decenas de miles de millones de choques de protones para producir un bosón de Higgs. Ello nos sitúa ante el reto de tener que analizar una cantidad descomunal de colisiones. Entre 2011 y 2012, en el LHC se han generado datos a partir de unos mil billones (10^{15}) de colisiones protón-protón.

Pero las dificultades no acaban ahí. Una vez producido, el bosón de Higgs se desintegra inmediatamente en otras partículas más comunes. Por tanto, no cabe observarlo de manera directa, sino que su existencia debe inferirse a partir de las partículas en las que se desintegra. El modelo estándar no predice la masa del bosón de Higgs. Sin embargo, para cada valor posible de la masa, lo que sí nos dice es con qué frecuencia debería desintegrarse de una forma u otra. Las posibilidades son varias, aunque dos de las señales más claras proceden de la desintegración en dos fotones y en cuatro leptones dotados de carga eléctrica (dos pares electrón-positrón o muon-antimuón). Por tanto, el segundo instrumento que necesitamos es un detector capaz de identificar esos productos de desintegración, medir todas sus características cinemáticas y reconstruir las propiedades de la partícula madre. ATLAS y CMS son los dos grandes detectores que se diseñaron para cumplir con este reto.

El LHC es el mayor y más potente acelerador de partículas jamás construido. Emplazado cerca de la ciudad de Ginebra, consta de un anillo de 27 kilómetros situado a unos cien metros bajo tierra. Se compone de más de 9600 imanes de tipos diversos, entre los que destacan 1200 dipolos superconductores que operan a 271 grados Celsius bajo cero, una temperatura inferior a la del espacio exterior. En el interior del anillo, los haces de protones circulan en sentidos opuestos por sendos tubos de ultravacío. En 2011 se aceleraban hasta alcanzar una energía de 3,5 teraelectronvoltios (TeV) cada uno, con lo que se provocaban choques frontales con una energía total de 7 TeV (unas 7500 veces la energía asociada a la masa de un protón). En 2012, las colisiones se han realizado a 8 TeV. En general, cuanto mayor sea la aceleración de los protones, de más energía dispondremos en cada choque para producir nuevas partículas. Las colisiones se provocan en zonas determinadas, para lo cual los haces de protones se focalizan por medio de lentes magnéticas. La precisión requerida puede compararse a la que se necesitaría para disparar dos agujas separadas una distancia de 10 kilómetros y conseguir que se encuentren en el camino. El proyecto del LHC fue concebido durante los años ochenta. Su construcción se aprobó a finales de 1994, y en 1998 comenzaron las excavaciones de las inmensas cavernas subterráneas que hoy albergan los detectores. La obra civil se prolongó durante cinco años.

Los detectores ATLAS y CMS se concibieron para cubrir el programa de investigación más amplio posible. La búsqueda del bosón de Higgs, por supuesto, pero también la de física más allá del modelo estándar: partículas supersimétricas, dimensiones adicionales del espacio, etcétera. Ambos detectores persiguen las mismas metas, pero trabajan de manera independiente y difieren en su diseño y soluciones técnicas. Con ello, se busca garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos por uno y otro.

La idea básica de un detector consiste en rodear por completo la región donde se producen las colisiones con gruesas capas cilíndricas, dispuestas a modo de barril en torno al tubo por el que circulan los protones, y cerradas en los extremos. Cada capa se encarga de detectar los distintos tipos de partículas que se producen en los choques.

La capa más interna rastrea la trayectoria de las partículas con carga eléctrica. Ello se consigue midiendo la ionización que dichas partículas generan en el material del dispositivo a medida que lo atraviesan. Suelen emplearse láminas finas de silicio divididas en píxeles (como los de las cámaras fotográficas) o en bandas finas para la lectura de carga, lo cual permite determinar la localización de la partícula. Este instrumento, denominado detector de trazas, se encuentra inmerso en un campo magnético que fuerza a las partículas con carga eléctrica a seguir una trayectoria helicoidal. Al medir esa trayectoria, puede inferirse el momento de la partícula.

El calorímetro electromagnético forma la siguiente capa. Su función consiste en absorber los fotones, electrones y positrones generados en los choques. Al penetrar en el calorímetro, estas

1964
Varios expertos (Peter Higgs entre ellos) proponen un mecanismo teórico que permite que las partículas portadoras de interacciones adquieran masa. Higgs vaticina que este modelo implica la existencia de un bosón masivo nunca antes detectado.

1967
Dicho mecanismo se incorpora a la teoría de las interacciones débiles y electromagnéticas. Ello permite entenderlas como una sola interacción fundamental y, como «efecto colateral», explica también la masa de las partículas elementales de materia. Con el tiempo, el bosón de Higgs se convertirá en la partícula más buscada por los físicos.

1994
El CERN aprueba la construcción del LHC, el instrumento científico más complejo jamás construido. Uno de sus principales objetivos será encontrar el bosón de Higgs.

1998
Comienzan las excavaciones para instalar los grandes detectores ATLAS, CMS, ALICE y LHCb en el túnel subterráneo de aceleración que ya empleaba el LEP, el antecesor del LHC.



Construcción del detector CMS. ▶

partículas generan una «cascada electromagnética», la cual resulta de una cadena de reacciones en las que un fotón produce un par electrón-positrón, que a su vez emiten un fotón, etcétera. Las partículas generadas a lo largo de la cascada presentan energías cada vez menores, hasta que finalmente el calorímetro absorbe toda la energía de la partícula inicial. La señal total que deja la cascada resulta proporcional a dicha energía, motivo por el que el dispositivo recibe el nombre de calorímetro. Los hadrones (las partículas formadas por quarks, como los piones, protones, neutrones, etcétera) interaccionan de otra manera y requieren más materia para ser absorbidas por completo. De esa absorción se encarga la tercera capa, el calorímetro hadrónico.

Por último, los muones (partículas similares al electrón, pero de mayor masa) interaccionan mucho menos con la materia ordinaria y consiguen atravesar los calorímetros. Se detectan también gracias a la ionización que generan al pasar por las cámaras de muones, enormes dispositivos dispuestos alrededor de los calorímetros y en la parte más externa del detector. También en este caso se necesita un campo magnético para curvar sus trayectorias y poder así medir su momento. Mientras que en ATLAS se genera un campo toroidal con ocho grandes bobinas superconductoras en el barril central y otras bobinas situadas en los extremos, en CMS se utiliza el campo de retorno (exterior a la bobina) del potente solenoide central que, en su interior, genera un campo magnético de cuatro teslas, cien mil veces más intenso que el campo magnético terrestre.

Los neutrinos, en su calidad de partículas carentes de carga eléctrica y que apenas interaccionan con la materia, escapan de los detectores sin dejar rastro. En principio, su presencia puede inferirse cuando se observa que en un suceso «falta» momento o energía. No obstante, ello da lugar a no pocas complicaciones, ya que en ocasiones esa falta de energía puede deberse a un error instrumental, pero interpretarse erróneamente como la producción de un neutrino.

Los detectores ocupan un tamaño enorme, equivalente al de un edificio de varias plantas cada uno. Ello se debe a que las partículas generadas en los choques salen disparadas en todas direcciones con energías muy elevadas, por lo que recorren largas distancias antes de ser detectadas o absorbidas. Además, las señales deben poder leerse con una granularidad muy fina, a fin de reconstruir las trayectorias o las cascadas con la mayor precisión posible. Para ello, cada detector cuenta con unos 90 millones de canales de lectura de datos, lo que les permite acumular enormes cantidades de información. Cada año se registran más de 3000 teraoctetos: el equivalente a 7 kilómetros de CD-ROM apilados, o 600 años de canciones. De hecho, el numero de colisiones registradas se encuentra limitado por el volumen de datos que resulta posible almacenar. Por ello, ambos experimentos requieren un sistema de selección de datos en tiempo real que les permita identificar y registrar las colisiones de mayor interés. Por sí solo, esto ya constituye un reto de enormes proporciones: aunque cada segundo se producen unos 20 millones de colisiones de protones (una o más cada 50 nanosegundos), se graban solo unos cientos de ellas.

SEÑAL Y RUIDO

Una vez almacenados los datos, su tratamiento procede en dos etapas. Primero, con la información registrada por el detector de trazas se reconstruyen las trayectorias de las partículas dotadas de carga eléctrica, se analiza la energía depositada en los calorímetros (ya sea el hadrónico o el electromagnético) y se reconstruye la trayectoria de los muones. Con estos datos, se elabora una lista de todas las partículas o chorros de partículas que se produjeron en un suceso. Para ello, las energías deben calibrarse con gran precisión.

A continuación, se analizan esos datos. Cada proceso físico que se desea estudiar queda caracterizado por su estado final; es decir, el número y naturaleza de las partículas que lo componen. A la hora de buscar sucesos con las características que se esperan de la desintegración de un bosón de Higgs, aparecen dos grandes dificultades. En primer lugar, tales procesos ocurren con una frecuencia extremadamente baja: por ejemplo, la producción de un bosón de Higgs y su desintegración en cuatro leptones ocurre una vez por cada diez billones (10^{13}) de colisiones entre protones. Pero, además, ese mismo tipo de estado final puede provenir de todo tipo de procesos «de fondo» en los que no se ha creado ningún bosón de Higgs. Los sucesos de fondo originan una ingente cantidad de «ruido» estadístico que dificulta sobremanera la identificación de los procesos genuinos en los que se ha generado una nueva partícula.

La relación entre el nivel de señal y el de fondo depende del modo de desintegración. La desintegración del bosón de Higgs en dos fotones goza de una señal mayor que la desintegración en cuatro leptones, pero presenta más fondo. Otro factor de gran importancia es la posibilidad de deducir la masa de la partícula madre. Esto puede lograrse con muy buena precisión en los procesos en los que se producen dos fotones o cuatro leptones dotados de carga eléctrica. Otros casos revisten mayor complejidad. Por ejemplo, el bosón de Higgs puede desintegrarse también en dos bosones *W*, cada uno de los cuales da lugar a un leptón cargado (un electrón o un muon) y un neutrino. Al no interaccionar con el detector, la presencia de dos neutrinos en el estado final dificulta la reconstrucción de la masa de la partícula de origen. A su vez, ello empeora la relación entre señal y ruido de fondo. Cada modo de desintegración necesita un cuidadoso estudio específico.

El proceso completo de operación de los detectores, reconstrucción de sucesos y tratamiento íntegro de los datos requiere

2008 2010 2011 2012

10 de septiembre de 2008
El primer haz de protones de prueba se hace circular con éxito por el anillo del LHC.



30 de marzo de 2010
Comienza la toma de datos: se producen las primeras colisiones entre protones con una energía total de 7 teraelectronvoltios, la energía más elevada alcanzada hasta ese momento en un acelerador de partículas.

◄ Los grandes imanes del detector ATLAS.

13 de diciembre de 2011
Se hacen públicos los primeros resultados significativos sobre la búsqueda del bosón de Higgs: aparecen indicios de la existencia de una partícula desconocida cuya masa rondaría los 125 gigaelectronvoltios (GeV).

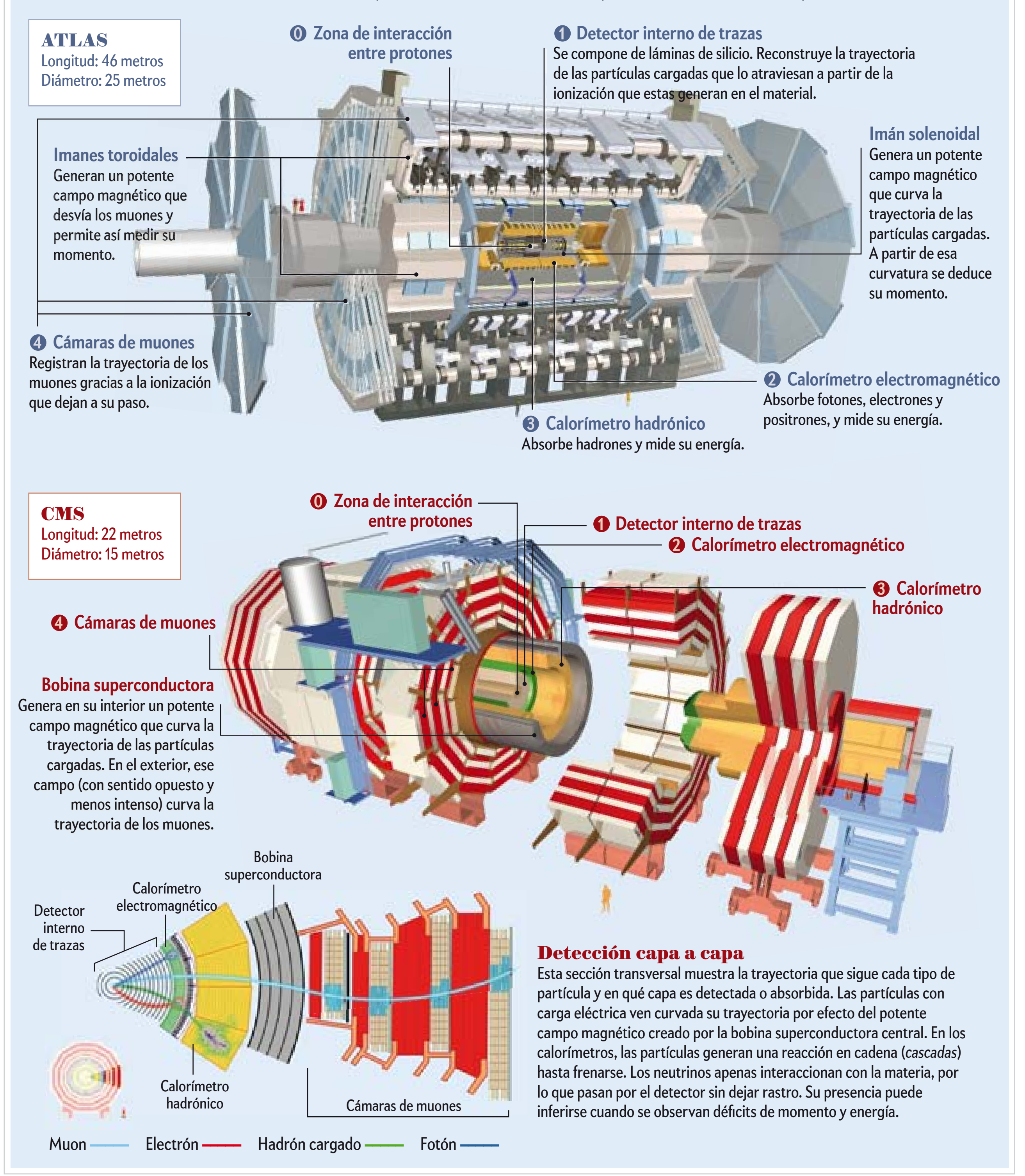
4 de julio de 2012
El CERN confirma el descubrimiento de una nueva partícula subatómica: un bosón con una masa de unos 125 GeV. Las propiedades de la partícula examinadas hasta el momento resultan compatibles con las que se atribuyen al bosón de Higgs del modelo estándar.

El auditorio del CERN celebra los resultados presentados el 4 de julio. ▼



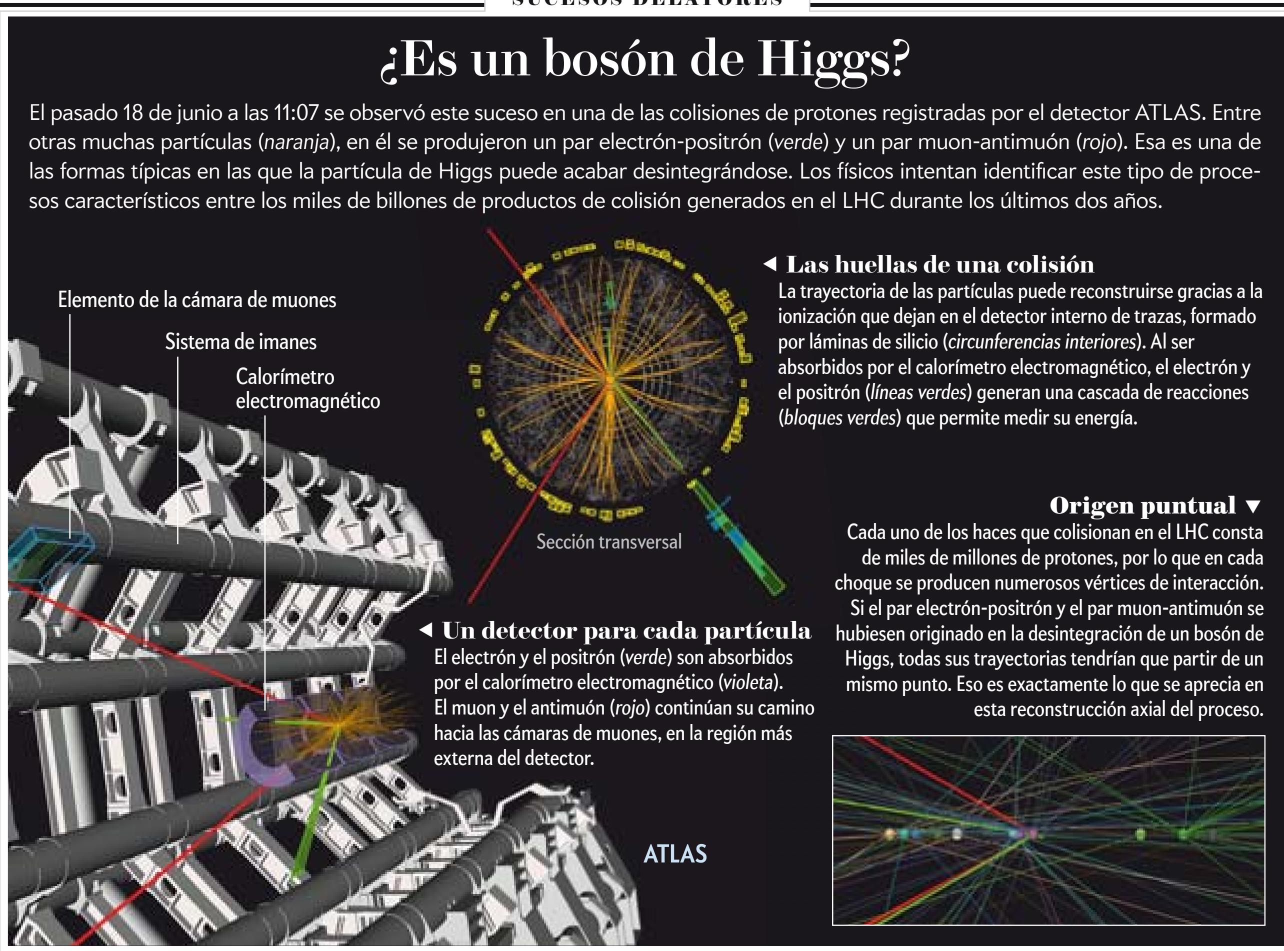
Anatomía de un detector

Los físicos esperan que en algunas —muy pocas— de las colisiones entre protones que lleva a cabo el LHC se produzcan bosones de Higgs. Estos, sin embargo, no pueden observarse de manera directa, ya que una vez creados se desintegran inmediatamente en otras partículas más comunes. Por tanto, deben analizarse las partículas producidas en esos choques e intentar deducir, a partir de sus propiedades, el proceso que las originó. Los gigantescos detectores ATLAS (*arriba*) y CMS (*abajo*) fueron construidos con este propósito. Constan de varias capas (*numeradas del interior al exterior*), cada una de las cuales se encarga de localizar o absorber partículas de un tipo específico. Su gran tamaño se debe a que las partículas emergen con una energía muy elevada, por lo que pueden recorrer grandes distancias antes de ser detectadas. ATLAS y CMS operan con tecnologías distintas para validar de manera independiente sus resultados.



Detección capa a capa

Esta sección transversal muestra la trayectoria que sigue cada tipo de partícula y en qué capa es detectada o absorbida. Las partículas con carga eléctrica ven curvada su trayectoria por efecto del potente campo magnético creado por la bobina superconductora central. En los calorímetros, las partículas generan una reacción en cadena (*cascadas*) hasta frenarse. Los neutrinos apenas interaccionan con la materia, por lo que pasan por el detector sin dejar rastro. Su presencia puede inferirse cuando se observan déficits de momento y energía.



enormes recursos humanos y de computación. No en vano, las colaboraciones ATLAS y CMS cuentan con más de tres mil miembros cada una, procedentes de unas 180 instituciones de 40 países. Analizar los datos en un tiempo tan breve ha sido posible gracias a una minuciosa preparación durante los últimos años, así como a los vastos medios del sistema de computación distribuida Grid del LHC, en el que participan instituciones de todo el mundo. De hecho, gran parte del trabajo se ha venido realizando en paralelo a la toma de datos: se han llevado a cabo numerosas simulaciones por ordenador tanto de los procesos de fondo como los de señal, al tiempo que se establecían las mejores estrategias para analizar los diferentes modos de desintegración del bosón de Higgs. En la mayoría de los casos, las características topológicas de los sucesos de señal permiten definir criterios de selección para optimizar la relación entre señal y ruido. En otros, sin embargo, la similitud entre ambos tipos de procesos es tal que solo su abundancia relativa permitirá discriminar entre ellos.

Para convencernos de que todo el proceso de calibración, análisis y selección se hace con el menor sesgo posible, en algunos casos se realizan «análisis ciegos». Se seleccionan muestras de datos en los que sabemos con seguridad que predominan los sucesos de fondo (o que, de existir señal, su contaminación sería mínima) y con ellos establecemos los parámetros finales del análisis: intervalos de confianza, correcciones específicas en el detector, calibraciones finales, relaciones de producción de los diferentes tipos de sucesos de fondo, etcétera. Solo entonces, cuando hemos aprovechado al máximo toda la estadística disponible y podemos afirmar que entendemos muy bien los procesos de fondo con nuestros nuevos datos, abrimos al análisis las regiones donde podría existir una señal de procesos relacionados con la producción del bosón de Higgs. Esto solo se lleva a cabo en el último momento, de ahí la gran expectación que, también entre nosotros, los investigadores, despiertan los resultados obtenidos en las últimas fases del análisis.

MIRAR EN TODOS LOS SITIOS

Una vez obtenidos los espectros de masa de las muestras de sucesos correspondientes a los distintos modos de desintegración, se procede al análisis estadístico de su composición en términos de los procesos esperados de fondo y de una señal hipotética del bosón de Higgs. Existen varias maneras de interpretar los resultados. Una de ellas consiste en determinar qué valores para la masa del bosón de Higgs quedan excluidos por nuestros datos. A tal fin, para cada valor supuesto de la masa del bosón de Higgs, se calcula cuál es la cantidad máxima de señal que toleran los datos por encima de los procesos de fondo. Para ello, se varía en la simulación la probabilidad de producción del bosón de Higgs. Si dicho límite máximo (experimental) para la producción de un bosón de Higgs con cierta masa resulta inferior al valor teórico predicho por el modelo estándar, la existencia de un bosón de Higgs con esa masa queda descartada.

El límite superior para la producción de bosones de Higgs se obtiene como resultado de un cálculo estadístico. Como tal,

siempre queda determinado hasta un cierto nivel de confianza. En los análisis que han llevado a cabo ATLAS y CMS, dicho nivel asciende al 95 por ciento. En otras palabras, los valores de la masa del bosón de Higgs excluidos por este método dejan un margen del 5 por ciento a que sí exista un bosón de Higgs con esa masa. Con todo, tras analizar todos los datos obtenidos por el LHC durante 2012 y añadirlos a las colisiones de 2011, ambos experimentos obtuvieron resultados muy similares: excluían la existencia del bosón de Higgs en casi todo el intervalo de masas posibles, salvo en una pequeña ventana entre los 122 y 128 gigaelectronvoltios (GeV).

Otra manera de analizar los datos consiste en comparar el número de procesos observados de un cierto tipo (por ejemplo, la producción de dos fotones) con los que esperaríamos medir si solo tuviesen lugar procesos de fondo; es decir, suponiendo que no se ha producido ningún bosón de Higgs. Tanto en el canal de producción de dos fotones como en el de cuatro leptones, ATLAS y CMS observaron excesos significativos de eventos cuando la energía rondaba los 125 o 126 GeV: exactamente en la misma región de masas en la que no podían descartar la existencia del bosón de Higgs.

Sin embargo, los procesos de fondo pueden fluctuar sobre el valor esperado, por lo que siempre cabe la posibilidad de que imiten el efecto de un exceso. Una manera complementaria de interpretar un análisis como el anterior consiste en calcular una cantidad estadística denominada *valor local de* p_0. Este nos da la probabilidad de que los sucesos de fondo generen un exceso de eventos similar al que correspondería a la producción de un bosón de Higgs. Tras combinar hasta cinco modos de desintegración (incluyendo la desintegración en pares de quarks *b* y de tauones) en todos los datos acumulados durante 2011 y 2012, ambos experimentos obtuvieron un valor de p_0 próximo a la unidad para casi todos los valores posibles de la masa... salvo en una región: en torno al valor de 125 o 126 GeV, la probabilidad de que los procesos de fondo generasen por sí solos un perfil de datos como el observado descendía bruscamente a uno entre 1,7 millones en el experimento CMS, y a casi uno entre 600 millones en ATLAS.

El valor de p_0 puede expresarse en número de desviaciones estándar, o sigmas. Una desviación estandar se corresponde con la «anchura típica» de una campana de Gauss: la región en torno a la media en la que se encuentran el 68 por ciento de los datos. A una distancia de dos sigmas en torno al valor medio, la campana de Gauss incluye más del 95 por ciento de los datos. Por convenio, para proclamar un descubrimiento en física de partículas se exige que las desviaciones con respecto a la señal de fondo presenten una significancia estadística local de cinco sigmas. Eso quiere decir que la probabilidad de que el resultado se deba a un efecto espurio debe ser inferior a uno entre 1,7 millones.

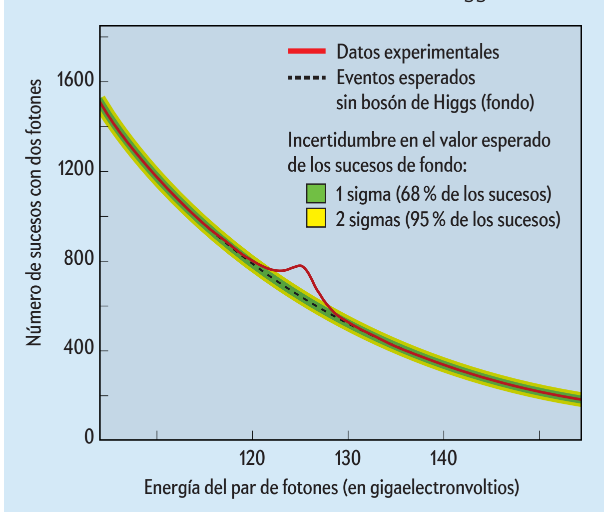
Sin embargo, aquí no acaba la historia. Un análisis riguroso requiere tener en cuenta el efecto conocido como «mirar en otros

PROCESOS DE FONDO

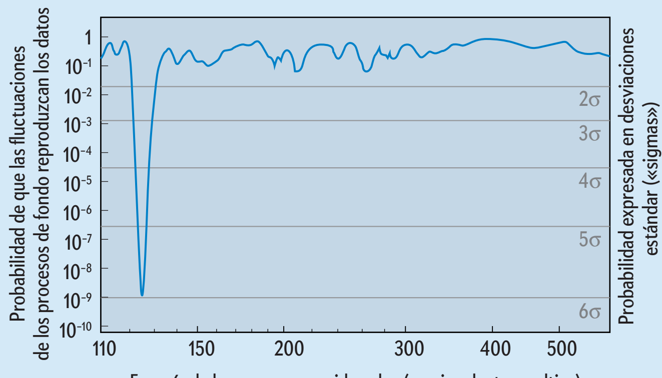
Una aguja en un océano de paja

El modelo estándar no predice la masa del bosón de Higgs. Pero, para cada valor posible de su masa, sí predice con qué probabilidad debería desintegrarse de una forma u otra: en dos fotones, en cuatro leptones, etcétera. Los físicos buscan esos productos de desintegración característicos entre todas las colisiones de protones registradas en el LHC.

Sin embargo, esos mismos productos pueden también originarse en una gran cantidad de procesos «de fondo» en los que no se produce ningún bosón de Higgs. Una parte esencial del análisis de datos consiste en contar todos los sucesos de un mismo tipo y compararlos con los se esperaría observar si solo hubiese procesos de fondo. Un exceso de los primeros sobre los segundos podría constituir un indicio de la existencia del bosón de Higgs.



Esta gráfica muestra los sucesos con dos fotones registrados por el detector CMS (*línea roja*), así como los que se espera que se deban solo a los procesos de fondo (*línea punteada negra*). Se observa un claro exceso de eventos cuando la energía de los fotones ronda los 125 gigaelectronvoltios, tal y como correspondería a la producción de bosones de Higgs con dicha masa.

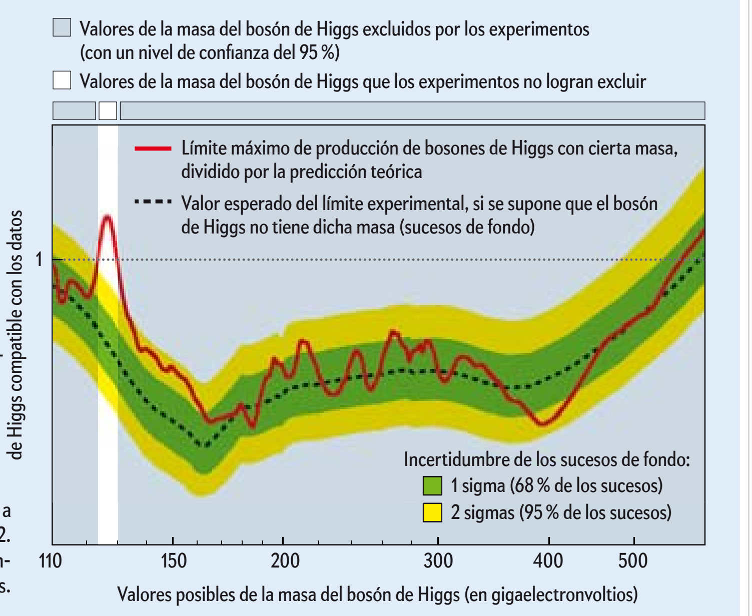


Los sucesos de fondo podrían fluctuar sobre su valor medio e imitar los efectos de un bosón de Higgs. Esta gráfica muestra la probabilidad de que las fluctuaciones en los procesos de fondo reproduzcan los datos que el detector ATLAS registró durante 2011 y 2012. Esa probabilidad cae bruscamente a casi de uno entre 600 millones (o 5,9 sigmas) cuando la energía de los sucesos asciende a unos 125 gigaelectronvoltios.

ADAPTADO DE: «OBSERVATION OF A NEW BOSON AT A MASS OF 125 GEV WITH THE CMS EXPERIMENT AT THE LHC». COLABORACIÓN CMS, 31 DE JULIO DE 2012 (*canal difotónico*); Y DE: «OBSERVATION OF A NEW PARTICLE IN THE SEARCH FOR THE STANDARD MODEL HIGGS BOSON WITH THE ATLAS DETECTOR AT THE LHC». COLABORACIÓN ATLAS, 31 DE JULIO DE 2012 (*valor local de* p_0)/CERN

¿Dónde no está el bosón de Higgs?

Otra manera de analizar los datos consiste en determinar qué valores para la masa del bosón de Higgs quedan excluidos por los experimentos. Para cada valor supuesto de la masa del bosón de Higgs, se calcula el límite máximo de producción de la partícula que los datos pueden tolerar por encima de los procesos de fondo. Si dicho límite máximo es inferior a la predicción teórica de producción de bosones de Higgs con esa masa, su existencia queda descartada.



Esta gráfica muestra el resultado del análisis de exclusión a partir de los datos registrados por ATLAS durante 2011 y 2012. Solo existe un pequeño intervalo de masas que los experimentos no logran excluir: en torno a los 125 gigaelectronvoltios.

sitios» (o *look elsewehere effect*, en inglés). En realidad, en nuestros análisis buscamos algún exceso a lo largo de todo un intervalo de masas. Pero la probabilidad de que una fluctuación de fondo ocurra para un valor dado de la masa (el valor local de p_0 para esa masa) siempre será inferior a la probabilidad de que una fluctuación local aparezca en un valor *cualquiera* de todo el intervalo de masas investigado. Al considerar el espacio de masas comprendido entre 110 y 600 GeV, obtenemos que la probabilidad de que la señal de fondo genere un exceso similar al observado por ATLAS en un lugar cualquiera de ese intervalo asciende a uno entre 3 millones, equivalente a una confianza estadística de 5,1 sigmas.

CINCO SIGMAS

Hasta casi el último momento no tuvimos claro el mensaje final que arrojarían los datos. Los miembros de una colaboración tampoco conocíamos los resultados de la otra, si bien durante los días previos al seminario comenzaron a correr todo tipo de rumores. Durante las dos últimas semanas, las dos colaboraciones, cada una por separado, dimos el visto bueno a los resultados en reuniones casi diarias.

Como cabe imaginar, todos los miembros del equipo investigador siguen con gran interés un proceso así, por lo que los encuentros son multitudinarios. Cada uno, desde el más veterano hasta el estudiante más joven, puede tomar la palabra y es escuchado con atención. Resulta fundamental asegurarse de la validez de los análisis y de las conclusiones, así como disponer de una visión conjunta y común de todos los detalles. También debe comunicarse un mensaje científico adecuado, tanto a nuestros colegas de profesión como al gran público: uno preciso y claro, y que se atenga estrictamente a los resultados del trabajo. La complejidad y la solidez de este tipo de análisis no siempre resultan fáciles de trasmitir. El viernes 29 de junio, el director del CERN y los portavoces de ambos experimentos se reunieron, con compromiso de confidencialidad, para contrastar sus respectivos resultados. El comunicado se afinó hasta el momento en que se envió al CERN (el martes 3 de julio, con embargo hasta el día siguiente).

Ese período, el más emocionante que hemos vivido hasta ahora en el LHC, concluyó a finales de julio con la publicación simultánea por parte de los dos experimentos de sus respectivos resultados: la observación, con una significancia estadística de 5 y 5,9 sigmas, de una nueva partícula subatómica en la región de masas de 125-126 GeV y cuyas propiedades resultan, por ahora, compatibles con las del bosón de Higgs. Pero ¿qué bosón de Higgs? ¿El postulado en el marco del modelo estándar, o una versión más exótica? Para responder a esta pregunta deberemos acumular muchos más datos sobre la nueva partícula y sus modos de desintegración. También se procederá a combinar los datos obtenidos por ATLAS y CMS, con el objetivo de alcanzar la máxima precisión posible y examinar la coherencia mutua entre sus respectivos resultados.

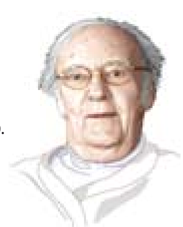
Las colisiones entre protones que aún se realicen en el LHC durante lo que queda de año quizá tripliquen la cantidad de datos acumulada hasta junio, lo cual permitirá afinar con una precisión mucho mayor el diagnóstico de la nueva partícula. Y, por supuesto, continuaremos buscando señales de nueva física. En febrero de 2013, el LHC iniciará una larga parada técnica a fin de realizar los ajustes necesarios para comenzar a finales de 2014 con colisiones a 13 TeV. Esto nos facultará para generar la nueva partícula en cantidades mucho mayores que ahora y, quizás, otras partículas de masas más elevadas. No se lo pierdan.

PARA SABER MÁS

El bosón de Higgs. Martinus J. G. Veltman en *Investigación y Ciencia* n.º 124, enero de 1987.
Los misterios de la masa. Gordon Kane en *Investigación y Ciencia* n.º 348, septiembre de 2005.
¿Está la partícula de Higgs asomando la cabeza? Alberto Casas en *Investigación y Ciencia* n.º 425, febrero de 2012.
El descubrimiento del bosón de Higgs. Alberto Casas en *Investigación y Ciencia* n.º 431, agosto de 2012.
Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Colaboración ATLAS, 31 de julio de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1207.7214**
Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Colaboración CMS, 31 de julio de 2012. Disponible en **arxiv.org/abs/1207.7235**
Página web de las colaboraciones ATLAS y CMS: **atlas.ch** y **cms.web.cern.ch**

CRÉDITO: ADAPTADO DE: «OBSERVATION OF A NEW PARTICLE IN THE SEARCH FOR THE STANDARD MODEL HIGGS BOSON WITH THE ATLAS DETECTOR AT THE LHC». COLABORACIÓN ATLAS, 31 DE JULIO DE 2012/CERN

Jeremy Bernstein es profesor emérito de física del Instituto de Tecnología Stevens, en Nueva Jersey. Ha escrito decenas de artículos de investigación, varias monografías técnicas y 14 libros de divulgación científica y senderismo. *Este artículo fue escrito cuatro meses antes de que el CERN anunciase el descubrimiento de una nueva partícula compatible con el bosón de Higgs.*



ALTAS ENERGÍAS

Un abanico de partículas

¿Qué argumentos teóricos llevan a predecir la existencia de una partícula subatómica?

Jeremy Bernstein

LA FÍSICA TEÓRICA EN EL SIGLO XX SE HA CARACTERIZADO POR LA DETECCIÓN DE PARTÍCULAS CUYA existencia había sido predicha con anterioridad; en ocasiones, con décadas de antelación. También nos hemos encontrado con toda suerte de partículas que nadie esperaba. En esta ocasión, sin embargo, nuestro interés se centrará en cinco partículas pertenecientes al primer grupo. En orden de modernidad creciente, nos referimos al neutrino, el mesón pi, el antiprotón, los quarks y, por último, el bosón de Higgs. Comencemos por el neutrino.

El 4 de diciembre de 1930, Wolfgang Pauli envió una carta a un grupo de físicos que asistían a un simposio en Tubinga. Tras dirigirse a ellos como «queridas damas y caballeros radiactivos», Pauli se disculpaba por no acudir a la conferencia. Bailarín y algo mujeriego, se justificó alegando que un baile le reclamaba en Zúrich durante las mismas fechas. La carta constituye uno de los documentos más sorprendentes de la física del siglo xx.

A Pauli le preocupaba cierta anomalía observada en la desintegración beta. Años antes, el físico neozelandés Ernest Rutherford había llevado a cabo un extenso estudio sobre la radiactividad. Había identificado tres tipos de desintegraciones, a las que denominó alfa, beta y gamma. Algunos núcleos pesados, como los de plutonio, se desintegraban emitiendo una partícula alfa, o un núcleo de helio. Otros desprendían rayos gamma, o cuantos muy energéticos del campo electromagnéti-

EN SÍNTESIS

En numerosas ocasiones, los físicos han predicho la existencia de una partícula subatómica mucho tiempo antes de que esta fuese observada en los experimentos.

Los argumentos para ello han sido de lo más variados: desde la conservación del momento hasta las propiedades matemáticas de algunos espacios algebraicos abstractos.

La existencia de antimateria apareció como consecuencia de combinar las leyes de la mecánica cuántica con las de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

El bosón de Higgs fue propuesto para reconciliar la masa de las partículas con la existencia de ciertas simetrías que implican la aparición de las interacciones.



Ernest Rutherford (*derecha*) y Hans Geiger en 1912 junto a los instrumentos que empleaban para detectar partículas alfa. Rutherford cambió para siempre la física de partículas con aparatos de mesa. Hoy en día, la disciplina depende de enormes máquinas, como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra.

co. Por último, había núcleos que producían una partícula beta: un electrón. Estos mostraban un comportamiento extraño.

La forma más obvia de imaginar el proceso consistía en suponer que un núcleo padre se transmutaba en un núcleo hijo y un electrón. Por tanto, como consecuencia de las leyes de conservación de la energía y el momento, todos los electrones emitidos de esa manera debían poseer la misma energía. Los datos experimentales, sin embargo, revelaban todo un abanico de energías. Tal era el rompecabezas que Niels Bohr llegó a proponer que la energía y el momento no se conservaban en la desintegración beta. Pauli, en cambio, opinaba que semejante propuesta carecía de sentido, por lo que propuso una explicación alternativa: sugirió que en la desintegración beta participaba una partícula invisible, la cual se llevaría parte de la energía y el momento. Esa partícula debía ser eléctricamente neutra y tenía que interaccionar muy débilmente con las demás. De esta manera, desaparecería de la escena sin dejar rastro.

Ignoro por completo cómo asimilaron las damas y los caballeros radiactivos semejante propuesta. Tampoco queda claro hasta qué punto el propio Pauli se la tomaba en serio, pues nunca llegó a publicarla. Pero Enrico Fermi, en Roma, sí le dio crédito. Ello le permitió formular la primera teoría sobre la desintegración beta. Pauli había denominado «neutrón» a la nueva partícula. En 1932, sin embargo, James Chadwick descubrió lo que hoy conocemos con ese nombre: el componente neutro de los núcleos atómicos. Además, en italiano *neutrone* significa «el gran neutro». Pero la nueva partícula, si existía, debía poseer una masa ínfima. Así que Fermi decidió llamarla *neutrino*, «el pequeño neutro». El nombre cuajó.

La primera vez que tuve noticia del neutrino, allá por los años cincuenta, su papel en la física nuclear resultaba incómodo, como el pariente loco de la familia al que todos desean ocultar. Esta circunstancia cambió con los reactores nucleares que Fermi construyó durante la guerra. Un reactor opera como una fábrica de elementos fisibles que se desintegran emitiendo partículas beta, por lo que generan ingentes cantidades de neutrinos. En 1956, los físicos Clyde Cowan y Fred Reines, que por aquel entonces trabajaban en Los Álamos, detectaron un flujo de más de 10 billones de neutrinos por segundo y centímetro cuadrado en las inmediaciones de la central nuclear de Savannah River, en Carolina del Sur. Podemos imaginar lo que debió sentir Pauli. Hoy los experimentos con neutrinos son moneda común. Sabemos que existen tres tipos distintos y que poseen una masa diminuta, lo que implica que se mueven a velocidades muy cercanas a la de la luz. Cierto experimento reciente (en su momento muy debatido y ahora ya refutado) pareció indicar que se movían ligeramente más deprisa que la luz, algo que hubiese contravenido la teoría de la relatividad de Einstein. «Queridas damas y caballeros radiactivos», en efecto.

EL MESÓN PI

En 1909, Ernest Rutherford y dos de sus estudiantes descubrieron en Manchester el núcleo atómico, la parte del átomo en la que se concentra la mayor parte de su masa. Ello suscitó preguntas sobre la composición de esos núcleos y qué era lo que mantenía unidos a sus componentes. Dado que, en condiciones normales, los átomos carecen de carga eléctrica neta, el núcleo debía contener cargas positivas. Los electrones, dotados de carga negativa, se hallaban distribuidos por todo el átomo, por lo que su carga había de compensarse con las cargas positivas del núcleo. Pero estas, a las que se dio en llamar protones, no podían ser el final de la historia. Para explicar la masa de los átomos hacían falta también objetos neutros. Rutherford propuso la razonable sugerencia de que quizás el núcleo contuviese protones y electrones. Pero, en 1930, Pauli y otros investigadores demostraron que esa idea no se ajustaba a los datos espectroscópicos. El misterio quedó resuelto en 1932, cuando Chadwick descubrió el neutrón. Pero entonces, ¿qué mantenía unido al núcleo?

El tamaño de un núcleo atómico es decenas de miles de veces menor que la distancia que lo separa de los electrones más cercanos. Los electrones se ocupan de la química, mientras que el núcleo desempeña la función de un simple espectador. Esta configuración nos indica que la fuerza atractiva entre protones y electrones se deja sentir a muy largas distancias. Pero esa misma fuerza hace que dos protones se repelan, por lo que, si no hubiese una interacción que la contrarrestase, el núcleo se disgregaría. Dicha interacción debía ser mucho más intensa que la fuerza electromagnética, pero de corto alcance. A estas preguntas se enfrentaban los físicos cuando apareció en escena Hideki Yukawa.

Yukawa nació en Tokio en 1907. Su padre enseñaba geología en la Universidad Imperial de Tokio, donde Yukawa estudió y obtuvo el grado de doctor en 1929, justo cuando Japón entraba en depresión. Trabajó como ayudante de un profesor de física teórica sin recibir por ello paga alguna, mientras continuó viviendo en casa de sus padres. El acceso a las publicaciones académicas le permitía seguir el rápido desarrollo de la teoría cuántica. En 1932, Werner Heisenberg publicó tres artículos sobre las fuerzas nucleares. Como Chadwick, Heisenberg creía que el neutrón era en realidad una partícula compuesta por otras; en concreto, por un protón y un electrón ligados. Eso implicaba que el núcleo atómico contenía electrones. Yukawa, en cambio, pensaba que los neutrones eran partículas elementales, no formadas por otras. Sobre esta idea basó su teoría de las interacciones nucleares.

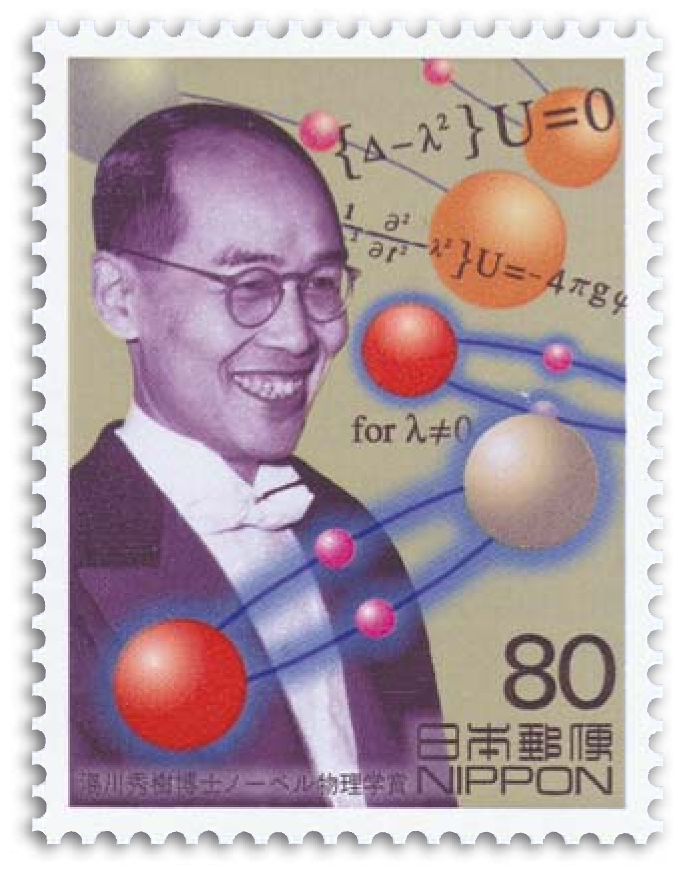
La descripción más clara de su teoría nos llega de la mano de los diagramas que Richard Feynman habría de concebir años más tarde. Examinemos primero el caso de dos electrones en interacción. La imagen que la electrodinámica cuántica nos brinda de este proceso se corresponde con dos electrones que intercambian un fotón «virtual», una palabra que quiere dar a entender que no podemos detectarlo de manera directa. Las matemáticas que describen dicho intercambio de fotones dan como resultado la misma fuerza repulsiva que, ya en el siglo XVIII, postulase el físico francés Charles-Augustin de Coulomb: su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia que media entre los objetos. Ello se debe a que la partícula transmisora, el fotón, carece de masa.

Pero la fuerza electromagnética no puede mantener el núcleo unido. Por varias razones: primero, porque es demasiado débil; y segundo, porque provoca que dos protones se repelan. Por tanto, Yukawa cambió el fotón por lo que él denominó «un cuanto pesado». Su teoría permitía elegir la intensidad del acoplamiento entre dicho cuanto pesado y los protones, por lo que Yukawa escogió un valor adecuado para que la atracción resultante venciese a la repulsión electromagnética. También la masa del cuanto pesado podía elegirse con libertad. Según las leyes de la mecánica cuántica, cuanto mayor es la masa de la partícula que media una interacción, menor alcance tiene esta. Yukawa conocía el tamaño del núcleo atómico, lo que le permitió deducir que la masa del cuanto intermediario debía ascender a unas 200 veces la del electrón. En 1934 escribió un artículo en un perfecto inglés que, un año después, vio la luz en una revista académica japonesa de prestigio. Su publicación pasó completamente inadvertida.

El cuanto pesado de Yukawa fue detectado en 1947 en los rayos cósmicos. Con el tiempo, acabó recibiendo el nombre de mesón pi. Existían tres variedades: una neutra, una con carga positiva y otra con carga negativa. Con buena aproximación, su masa se correspondía con la predicha por Yukawa. Las versiones dotadas de carga se desintegraban con rapidez en neutrinos y «mesones mu», como se llamaba entonces a los muones (partículas similares al electrón, pero de mayor masa). En 1949, Yukawa se convirtió en el primer japonés galardonado con el premio Nobel. Edward Teller, físico nuclear no precisamente conocido por su habili-

Wolfgang Pauli y Niels Bohr observan divertidos una peonza en la inauguración de un instituto de física en la ciudad sueca de Lund. El juguete se comportaba de manera distinta a la mayoría de las peonzas: giraba primero en un sentido y después en el opuesto. Años antes, Pauli había postulado la existencia de una nueva partícula elemental, el neutrino.

ERIK GUSTAFSON/CORTESÍA DE LOS ARCHIVOS VISUALES EMILIO SEGRÉ, COLECCIÓN MARGRETHE BOHR. INSTITUTO AMERICANO DE FÍSICA



El físico japonés Hideki Yukawa elaboró una teoría de las interacciones nucleares que predecía la existencia de un mesón que, con una masa intermedia entre la del protón y el electrón, mantenía unido al núcleo atómico. La teoría se vio respaldada por los experimentos cuando se detectaron los mesones pi en los rayos cósmicos. Yukawa fue el primer japonés en ganar un premio Nobel.

CORTESÍA DE SHUKI ZAKAI

dad para el verso humorístico, resumió su sorpresa ante el descubrimiento en los siguientes ripios:

Hay mesones pi y hay mesones mu.
Los primeros nos sirven como pegamento nuclear.
Hay mesones tau, o eso sospechamos,
y otros muchos que aún no detectamos.
¿Puedes verlos, acaso?
Bueno, apenas de refilón,
porque su vida es breve
y su alcance, escaso.
La masa puede ser poca y puede ser mucha.
Podemos hallar una carga positiva o una negativa.
Y algunos jamás se mostrarán en una placa,
pues su carga es cero, aunque grande es su masa.
¿Cómo? ¿Ninguna carga en absoluto?
No, ninguna en absoluto.
O, si Blackett está en lo cierto,
es tremendamente pequeña.

EL ANTIPROTÓN

En 1928, Paul Dirac escribió una ecuación para el electrón que conjugaba la teoría cuántica con la relatividad especial de Einstein. Hay quien afirma que se trata de la ecuación más hermosa de la física. Si bien quizá no haga falta llegar tan lejos, la expresión muestra una gran belleza:

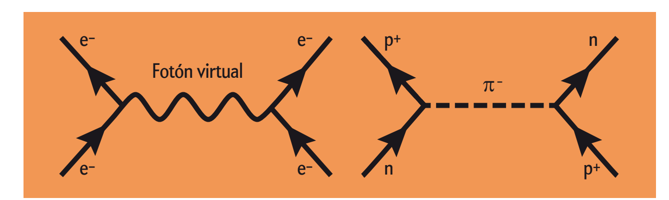
$$(i\hbar\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x^{\mu}} - mc)\,\psi(x^{\mu}) = 0\,.$$

Dirac convino de inmediato en que su ecuación sufría ciertos problemas. Para cada valor del momento del electrón existían cuatro soluciones, pero solo dos de ellas tenían sentido: las otras asignaban al electrón una energía negativa, algo absurdo. Durante un par de años, esto condujo a una situación que Pauli calificó de «física a la desesperada». Si el electrón poseía carga negativa y quedaba representado por las dos soluciones de energía positiva, entonces las otras dos debían corresponderse con una partícula idéntica al electrón, pero de carga opuesta. En ese momento nació la física de la antimateria. Por aquella época, sin embargo, nadie había observado ningún antielectrón. Eso cambió en 1933, cuando Carl Anderson, del Instituto de Tecnología de California, detectó uno en los rayos cósmicos. La nueva partícula acabó recibiendo el nombre de positrón.

Una vez que se descubrió el positrón, los físicos comenzaron a tomar en serio la antimateria: toda partícula debía tener su correspondiente antipartícula. En algunos casos, como el del fotón o el del mesón pi neutro, partícula y antipartícula son idénticas. Los neutrinos no poseen carga, pero a día de hoy continúa siendo una incógnita si coinciden o no con su antipartícula. Lo que sí queda fuera de toda duda es que, si una partícula tiene carga e, su antipartícula posee carga $-e$. Además, ambas deben tener exactamente la misma masa. En particular, el protón cuenta con una masa unas 2000 veces mayor que la del electrón y una carga igual a e. Por tanto, debía existir un antiprotón con la misma masa y con carga $-e$. ¿Cómo encontrarlo?

Los rayos cósmicos no ofrecían demasiadas posibilidades, ya que los antiprotones se aniquilan al entrar en contacto con la materia ordinaria y solo se observan los desechos de la desintegración. Hacía falta un acelerador con la potencia necesaria para crear un antiprotón. La idea consistía en acelerar un haz de protones a velocidades muy elevadas y luego estrellarlo contra un blanco; por ejemplo, hidrógeno líquido, un elemento cuyo núcleo consta solo de un protón. En la colisión se producirían antiprotones. Pero ¿cuánta energía necesitaría el acelerador? Aquí empezaban las complicaciones. Al principio tenemos dos protones, uno en el haz y otro en el blanco, de manera que la carga total asciende a dos unidades positivas. Deseamos crear un antiprotón, que posee una unidad de carga negativa. Dado que la carga total se conserva a lo largo del proceso, necesitamos que en el estado final haya tres protones y un antiprotón. Si llamamos p^c al antiprotón y p al protón, la reacción en la que estamos interesados viene dada por $p + p \rightarrow p + p + p + p^c$. No existe proceso más sencillo que ese. Pero ¿a cuánto debía ascender la energía mínima del protón del haz inicial? Un cálculo sencillo nos revela que esta debe equivaler a unas seis veces la masa del protón. Cuando se realizó esta estimación, no había acelerador en el mundo capaz de alcanzar semejante energía.

Hacia finales de los años cuarenta comenzaron los planes para construir dicha máquina en la Universidad de California en Berkeley. Allí trabajaba Ernest Lawrence, el inventor del ciclotrón. Además de un físico excelente, Lawrence gozaba del talento necesario para recaudar la cantidad de dinero que requería un acelerador de ese calado, al que se llamó Bevatrón, un nombre inspirado en la energía que se pretendía alcanzar. La empresa dio sus frutos: en 1955, un grupo de físicos experi-



Los diagramas de Feynman, con su propio alfabeto de símbolos, representan de forma muy intuitiva las interacciones entre partículas elementales. El diagrama de la izquierda muestra dos electrones intercambiando un fotón; el de la derecha, un protón y un neutrón intercambiando un mesón pi.

mentales anunció el descubrimiento del antiprotón [*véase el extracto* «El antiprotón», por Emilio Segrè y Clyde E. Wiegand; Investigación y Ciencia, julio de 2012]. No creo que el acontecimiento causase verdadera sorpresa a nadie, pero marcó el nacimiento de una buena cantidad de literatura fantástica dedicada a la antimateria.

En 1956, aquellos sucesos fueron narrados con gran detalle en *The New Yorker* en un poema firmado por H. P. F. Supe que las iniciales se referían a Harold Furth, físico y compañero mío en Harvard, donde escribía para la revista humorística universitaria *The Lampoon*. Bajo el título *Los peligros de la vida moderna*, su poema decía así:

Mucho más allá de la tropostrata
hay una región estelar y austera,
donde, en una veta de antimateria,
vivía el doctor Edward Anti-Teller.
Muy alejado de los orígenes de la Fusión,
vivía anónimo y tranquilo,
con todos sus antifamiliares y amigos,
y con macasares en sus sillas.
Una mañana, holgazaneando en el mar,
avistó un platillo de monstruoso contorno
que portaba tres letras: A. E. C.
y desde el que se alzó un visitante de la Tierra.
Entonces, gritando con regocijo sobre las arenas,
se encontraron dos seres que, a su extraña manera,
eran tan iguales como dos lentejas.
Sus manos derechas se estrecharon
y el resto fueron rayos gamma.

Desconozco dónde se encuentra la «tropostata», pero donde sin duda puede hallarse una gran cantidad de antiprotones es en el cinturón interior de Van Allen. Los cinturones de Van Allen son regiones anulares que rodean nuestro planeta y en las que las partículas quedan retenidas por efecto del campo magnético terrestre. El cinturón interior se extiende entre unos 1000 y 10.000 kilómetros por encima de la superficie de la Tierra. Algunos protones de energía muy elevada permanecen atrapados

En la película *Ángeles y Demonios,* de 2009, los protagonistas tratan de evitar la construcción de una bomba de antimateria. El concepto de antimateria ha creado cierto revuelo en la opinión pública. En 1930, Paul Dirac predijo la existencia de la antipartícula del electrón tras desarrollar la primera descripción del electrón compatible a la vez con la mecánica cuántica y la relatividad especial de Einstein. Los físicos del Laboratorio Nacional Lawrence usaron el Bevatrón para producir el antiprotón.

COLUMBIA PICTURES/COLECCIÓN KOBAL (*fotograma*)

allí, donde producen antiprotones mediante procesos muy similares a los que se realizaron en el Bevatrón. Por fortuna, no hay tantos como para que supongan una amenaza para los viajes espaciales.

EL QUARK

Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark.
And sure any he has it's all beside the mark.
(James Joyce, *Finnegans Wake*)

En marzo de 1963 asistí a una conferencia de Murray Gell-Mann en la Universidad de Columbia. En ella, el físico expuso una teoría que había concebido para clasificar partículas elementales. No sin cierto humor, su método se denominaba *camino óctuple*. De acuerdo con la doctrina budista, para llegar al nirvana debe seguirse el «noble camino óctuple», que invita a observar un discurso correcto, una intención correcta y una meditación correcta. El camino propuesto por Gell-Mann para alcanzar el fin del sufrimiento consistía, en cambio, en un modelo para clasificar una desconcertante cantidad de partículas que nadie había predicho ni entendía. El número ocho desempeñaba en él un papel esencial. A pesar de sus aparentes diferencias, las partículas parecían poder clasificarse en *multipletes*: conjuntos de partículas con características predecibles. Uno de los primeros que se identificaron fue un octuplete (u «octeto») que incluía, entre otros, los mesones pi.

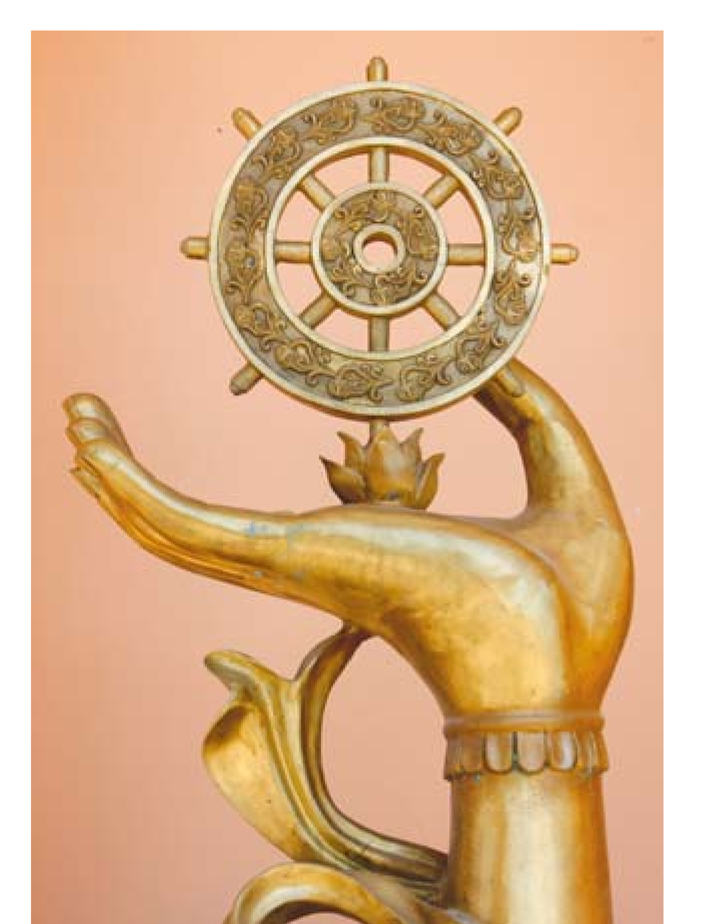
En el seminario, Robert Serber, un físico de la Universidad de Columbia tan brillante como reservado, formuló una pregunta. Había estudiado el trabajo de Gell-Mann y se había apercibido de que el multiplete más sencillo que podía construirse era uno que contenía solo tres partículas. ¿Había considerado Gell-Mann tal posibilidad? Sí, pero le había llevado a un callejón sin salida. Gell-Mann comentó algo sobre el tema y, más tarde, se unió a algunos de nosotros en un restaurante chino. Allí tuvo lugar una frenética discusión.

Imaginemos que tal triplete existe, se dijo en la conversación. La idea entonces consistiría en usar esas tres partículas a modo de ladrillos para construir todas las demás. Eso ya se había intentado con anterioridad. Fermi, entre otros, había imaginado que los mesones pi se componían de protones, neutrones y sus correspondientes antipartículas. El mesón pi con carga negativa estaría formado por un neutrón y un antiprotón. Pero, cuando empezaron a descubrirse todas aquellas partículas nuevas, quedó claro que había que generalizar la idea.

El japonés Soichi Sakata había propuesto un modelo en el que todas las partículas se hallaban compuestas por otras tres que él creía más elementales: el protón, el neutrón y el Λ^0 (lambda cero), una nueva partícula que había sido descubierta poco antes. Aunque todas las partículas conocidas podían construirse a partir de esas tres, el modelo de Sakata no resultaba demasiado convincente. No solo no explicaba por qué esas tres partículas eran más elementales que el resto, sino que predecía otras que no habían sido observadas jamás. Por último, tampoco se mostraba compatible con el camino óctuple, que tan bien parecía funcionar. Así pues, Gell-Mann se vio obligado a empezar de cero.

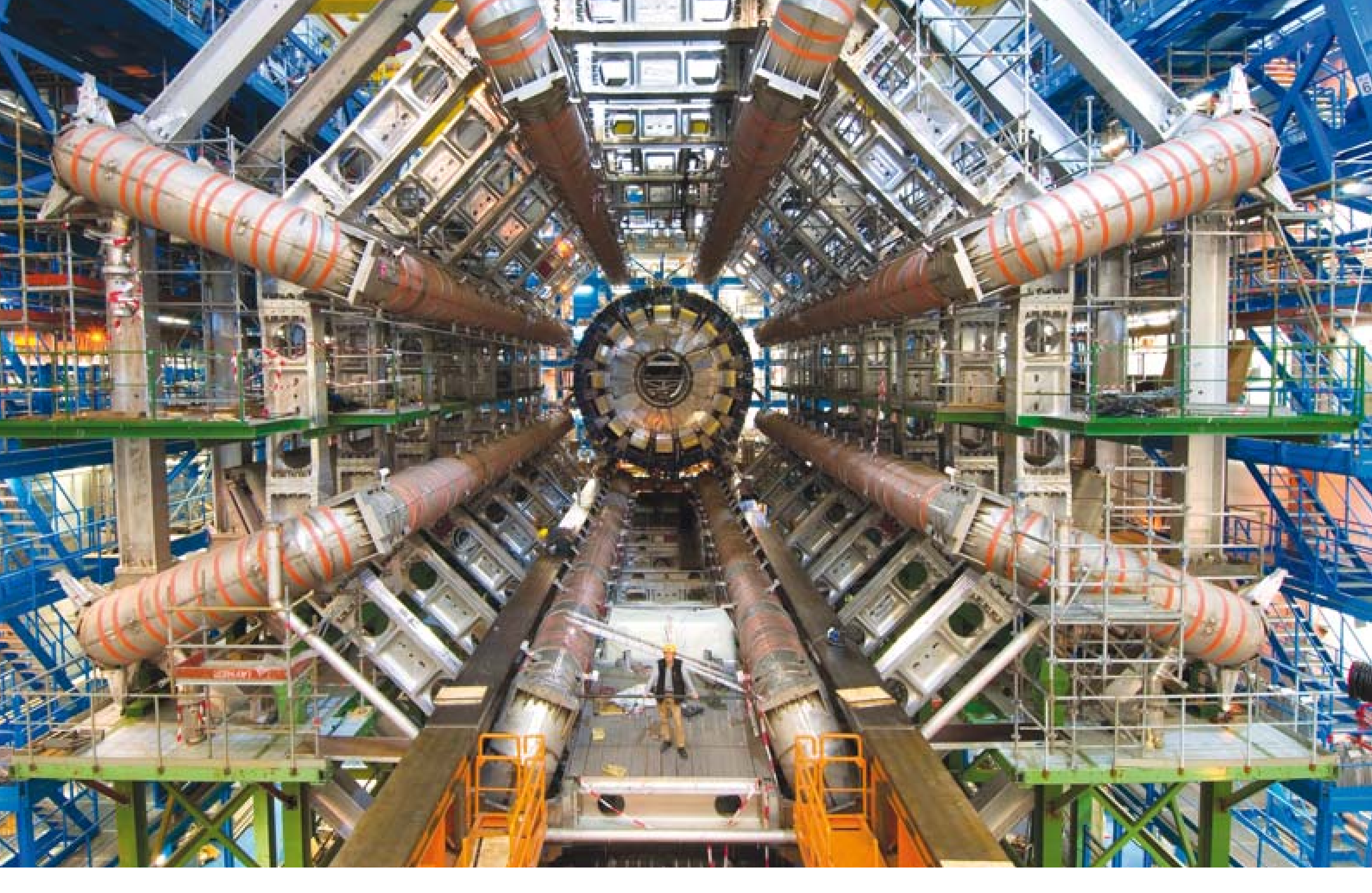
No había ninguna razón para que el triplete del camino óctuple tuviese que estar compuesto por partículas ya conocidas. De hecho, el modelo de Sakata parecía insinuar que era mejor no ir en esa dirección. Así que Gell-Mann introdujo tres partículas hipotéticas nuevas a las que llamó *arriba*, *abajo* y *extraño*; o *u*, *d* y *s*, respectivamente (sus iniciales en inglés). Ahora ya podía empezar a construir las partículas conocidas. El protón, por ejemplo, constaría de la combinación *uud*; el neutrón sería *udd*, y la partícula Λ^0, *uds*. Pero entonces surgía un problema: ¿qué carga eléctrica poseían las nuevas partículas? Hasta ese momento, todas las cargas observadas en la naturaleza se correspondían con un múltiplo entero de la del electrón. Si a este se le asigna carga –1, al protón le corresponde el valor +1. Si aplicamos dicha regla a los ladrillos *u*, *d* y *s* con el objeto de reproducir las cargas de las demás partículas, nos veremos en un callejón sin salida. Imaginemos que a la partícula *u* le asignamos una unidad de carga. Para obtener la carga del protón (*uud*), la partícula *d* debería poseer entonces una unidad de carga negativa. Pero, en tal caso, el neutrón (*udd*) tendría también carga negativa. Resulta imposible cuadrar las cuentas si nos empeñamos en manejar múltiplos enteros de la carga del electrón. ¿Qué hacer?

Gell-Mann intentó algo que solo podía tratarse de una locura o de una genialidad: asignar cargas fraccionarias. La partícula *u* quedaba así con carga +2/3, mientras que a *d* y *s* les adjudicó el valor –1/3. El modelo funcionaba, pero a costa de introducir un tipo de partículas que nunca nadie había observado. ¿Dónde estaban? Deberían verse como el Sol en un cielo despejado. La búsqueda comenzó de inmediato.



En esta estatua del templo Budista de Khanh Anh, en Francia, una mano abierta sostiene la rueda del *dharma*, empleada para simbolizar el «noble camino óctuple», o los ocho principios básicos del Budismo. En los años sesenta, Murray Gell-Mann desarrolló una teoría para clasificar la gran cantidad de partículas que habían sido detectadas en los aceleradores. El modelo fue bautizado como *camino óctuple*, pues sus propiedades matemáticas dependían de ese número en un álgebra abstracta. Ello le llevó a predecir la existencia de los quarks.

PASCAL DELOCHE/GODONG/CORBIS



El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) **del CERN no es solo el acelerador de partículas más potente que existe, sino también el mayor experimento físico jamás construido. Con él, los físicos intentan estudiar las condiciones a las que se encontraba la materia poco después de la gran explosión. Para ello, hacen colisionar haces de partículas subatómicas llamadas hadrones (ya se trate de protones o de núcleos atómicos pesados) a energías muy elevadas. Es de esperar que tales experimentos aporten pistas sobre el origen de la masa de las partículas fundamentales. Uno de los objetivos del LHC es hallar el bosón de Higgs, cuya existencia fue propuesta hace casi cuarenta años.**

CORTESÍA DEL CERN

Mientras, Gell-Mann decidió darles nombre. Cuando había comenzado a pensar en las nuevas partículas, le había venido a la cabeza un sonido relacionado con una de sus aficiones, la ornitología: algo así como *cuac*. Pero Gell-Mann siempre había mostrado un gran interés por la lingüística y los juegos de palabras como los que llenan *Finnegans Wake*, de James Joyce. Un día, al hojear el libro, dio con la frase «¡Tres quarks para Muster Mark!». Ello le bastó para decidirse a fijar en *quark* la grafía del nuevo vocablo. Había nacido un nuevo término. (Con independencia de la palabra alemana *Quark*, que designa un tipo de queso fresco.)

Muy pronto quedó patente que los quarks libres no se observarían jamás. Haciendo de la necesidad virtud, se inventó una dinámica que confinaba los quarks en el interior de las partículas. Según esta idea, los quarks intercambiarían *gluones* (de la voz inglesa *glue*, «pegamento»). Pero la dinámica de los gluones exhibía una característica muy peculiar. Antes mencionamos que la intensidad de las fuerzas decrece con la distancia. En el caso de la interacción mediada por mesones pi, de hecho, ese desvanecimiento ocurre muy deprisa. Los gluones, sin embargo, se rigen por el principio opuesto. Podemos pensar en una goma elástica: la fuerza que tira de sus extremos aumenta cuanto más la estiramos. Por supuesto, llega un momento en el que la goma se rompe. Pero con los quarks no ocurre así: la fuerza entre ellos simplemente crece con la distancia de separación. Por tanto, permanecerán siempre prisioneros en sus celdas, las partículas.

Para algunos, semejante propiedad suscitaba una pregunta: ¿hasta qué punto podemos decir que los quarks existen? Cuando la oí por primera vez, recordé las discusiones de finales del siglo XIX y principios del XX acerca de si los átomos existían realmente. Por aquel entonces, aún no se habían observado. Einstein, lúcido testigo de la época, lo explicó así: hay dos tipos de átomos, el del físico y el del químico. Este último corresponde a un *símbolo visual*. Podemos dibujar un diagrama de la molécula de agua sin conocer en absoluto la masa ni el tamaño de los átomos de hidrógeno u oxígeno. Pero los físicos sí desean saber el valor preciso de esas masas y tamaños. Un químico argumentaría que los átomos existen, mientras que un físico podría expresar sus reservas. Pero con los quarks la situación se plantea mucho más peliaguda, pues, en estado libre, resultan inobservables por cuestión de principio.

En 1960 se construyó un nuevo acelerador, el Colisionador Lineal de Stanford. Al contrario que en los ciclotrones, donde las partículas viajan en círculos, la nueva máquina aceleraba electrones a una energía muy elevada a lo largo de un camino recto de dos kilómetros y los hacía colisionar contra un blanco de protones. La mayoría de los físicos pensaban que los electro-

nes atravesarían los protones sin más. Pero no sucedió así. Los resultados mostraban que los electrones se topaban con objetos duros en el interior del protón. Aún más: esos objetos poseían las cargas fraccionarias asignadas a los quarks. A partir de entonces, argumentar que los quarks no existían se volvió mucho más complicado.

Sería una negligencia no resumir lo que ocurrió tras ese descubrimiento. Hoy sabemos que hay seis tipos de quarks. Además de los anteriores, existen las variedades *encanto*, *fondo* y *cima*; o *c*, *b* y *t*. Todos poseen cargas fraccionarias, y sus masas abarcan desde una pequeña fracción hasta unas 200 veces la masa del protón. Pero la situación resulta algo más compleja. Las leyes de la mecánica cuántica imponen que una partícula no puede contener dos quarks idénticos, lo cual se debe al principio de exclusión de Pauli. El protón contiene dos quarks *u*; sin embargo, el problema se evita porque cada uno de ellos puede adoptar un estado con distinto momento angular. Pero en 1964 se descubrió en el Acelerador Nacional de Brookhaven una partícula llamada Ω^- (omega menos). El camino óctuple de Gell-Mann había predicho su existencia, pues era la pieza que faltaba en un decuplete. Sin embargo, se componía de tres quarks *s*, algo que el principio de exclusión de Pauli ya no permitía.

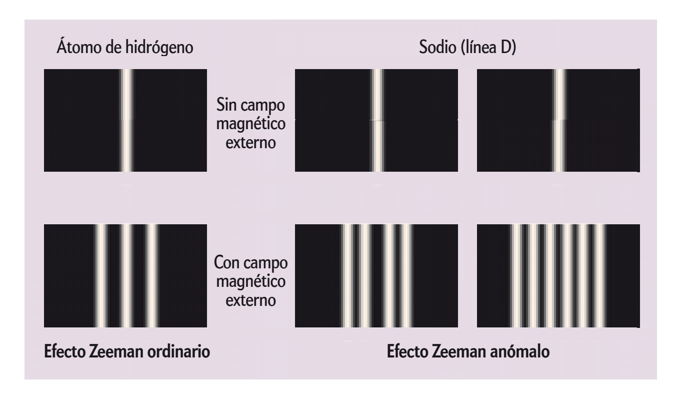
Para obtener distintos tipos de quarks, los teóricos inventaron una nueva propiedad denominada «color». Aquí la palabra no sirve más que como metáfora para indicar cierto rasgo que permite distinguir entre unos quarks y otros. La elección de los colores suele reflejar la nacionalidad del físico que habla de ellos. A algunos estadounidenses les gusta usar el rojo, el azul y el blanco. Por tanto, cuando decimos que la partícula Ω^- se encuentra formada por tres quarks *s*, se entiende que cada uno de ellos posee un color distinto. Si usted cree que todo lo anterior resulta complicado, debería echar un vistazo a la lista de partículas conocidas. Que todas ellas se hallen compuestas por una cantidad tan limitada de objetos con apenas unas pocas propiedades constituye un hecho realmente destacable.

EL BOSÓN DE HIGGS

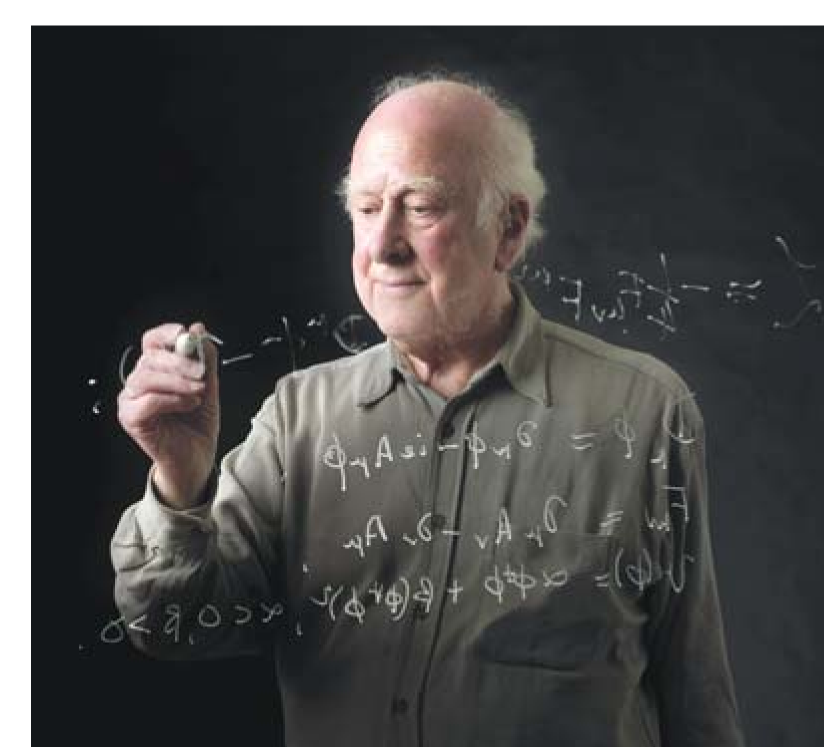
Desde el principio estuvo claro que el camino óctuple aparecía como consecuencia de una simetría aproximada. Ello quedaba patente por la masa de las partículas. Los mesones pi formaban parte de un octuplete junto a los mesones *K*, pero la masa de los segundos superaba en unas tres veces a la de los primeros. De tratarse de una simetría exacta, todas las partículas pertenecientes a un mismo octuplete poseerían la misma masa. De hecho, si nos fijamos en las propiedades de estas partículas, no resulta nada evidente que guarden relación alguna entre sí. Ello dificultó enormemente la búsqueda de la simetría que las unificaba.

El tipo de ruptura de simetría presente en el camino óctuple es tan antiguo como la propia mecánica cuántica. Fue considerado por vez primera por el matemático Hermann Weyl y el físico Eugene Wigner, quien lo aplicó a los espectros atómicos. En el átomo, los electrones se mueven en «órbitas» alrededor del núcleo. La cuantización de esas órbitas supuso la culminación de un gran trabajo por parte de Niels Bohr. Los electrones tienden a situarse en la órbita de menor energía, o estado fundamental. Pero, si la energía térmica o un impulso eléctrico excita el átomo, los electrones saltan a órbitas más energéticas. Cuando la perturbación cesa, regresan a las órbitas originales y, en el proceso, emiten radiación. Esta produce los característicos espectros atómicos. El espectro de un átomo viene a ser como su huella dactilar, por lo que siempre nos revela de qué elemento se trata. Gracias a ello sabemos, por ejemplo, que la atmósfera del Sol contiene helio.

Las líneas de un espectro atómico reflejan las distintas simetrías que exhiben las órbitas de los electrones. Sin embargo, cuando colocamos un átomo en un campo magnético, algunas simetrías pueden perderse. Como consecuencia, lo que antes aparecía como una sola línea se divide en un grupo de ellas. Resulta posible calcular el número y la intensidad de dichas divisiones, pues quedan determinadas por la simetría que ha desaparecido. Este tipo de ruptura de simetría, considerado por Wigner y Weyl, es el que tiene lugar en el camino óctuple. Aparece una perturbación que rompe la simetría, de manera que surgen diferencias entre las masas de los componentes de un multiplete. Si efectuamos los cálculos con cuidado, obtendremos que di-

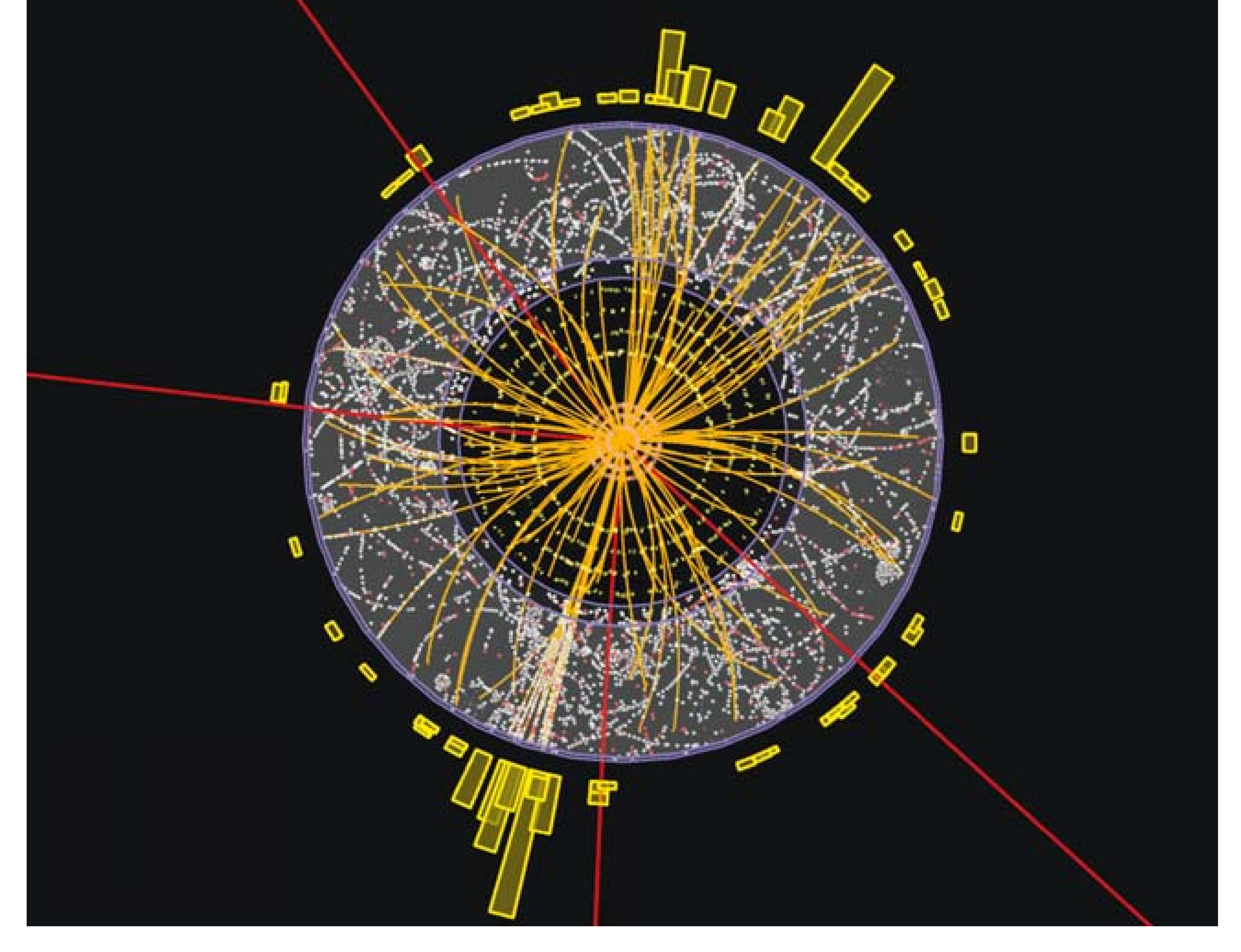


Estas figuras muestran la división de las líneas de los espectros atómicos cuando se aplica un campo magnético externo. En el efecto Zeeman ordinario, cada una se divide en tres líneas equiespaciadas. Ocurre cuando el espín del átomo, su momento angular intrínseco, es cero. El efecto Zeeman anómalo se debe al espín del electrón.



Peter Higgs, físico teórico de la Universidad de Edimburgo, explicó cómo las partículas fundamentales adquirieron masa cuando la gran explosión formó el universo. También predijo la existencia de la partícula elemental que hoy conocemos como bosón de Higgs.

CERN/PHOTO RESEARCHERS (*Peter Higgs*)



El pasado mes de diciembre **el CERN hizo pública esta imagen, tomada en el detector del experimento ATLAS del LHC. En ella se observan cuatro muones que han sido creados tras una colisión entre protones. Dicho proceso es uno de los que se espera observar en caso de que se produzca un bosón de Higgs. El experimento ATLAS ha ayudado a delimitar el intervalo de masas posibles que podría tener el bosón de Higgs.**

CORTESÍA DEL CERN

chas variaciones entre las masas se encuentran relacionadas. Dicho resultado coincide con los datos experimentales, lo cual aumenta nuestra confianza en el modelo.

Supe por primera vez de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl a finales de los años sesenta, en mis cursos de mecánica cuántica. Pero, en 1961, Yoichiro Nambu y su estudiante Giovanni Jona-Lasinio publicaron dos artículos que lo cambiaron todo: introdujeron un tipo completamente nuevo de ruptura de simetría. En el discurso que Nambu pronunció al recoger el premio Nobel en 2008, propuso el siguiente ejemplo: «Consideremos una barra elástica en posición vertical. Esta posee una simetría frente a rotaciones, ya que presentará el mismo aspecto sea cual sea la dirección horizontal desde la que miremos. Pero, si aplicamos presión y la barra se comba, lo hará en una dirección determinada y la simetría desaparecerá. En principio, la flexión podía haberse producido en cualquier dirección, pues todas ellas eran equivalentes. Pero no apreciaremos ese hecho hasta que no repitamos el experimento varias veces».

Otro ejemplo consiste en tomar la misma barra y colocarla de pie en el suelo. La mecánica cuántica nos dice que nunca adoptará una posición perfectamente vertical: siempre existirá una indeterminación mínima en el ángulo que forme con el suelo. En algún momento caerá. Puede hacerlo en cualquier dirección, pero, una vez que eso ocurra, la simetría original habrá desaparecido. De forma más abstracta, diremos que una ecuación puede exhibir ciertas simetrías, pero sus soluciones no están obligadas a respetarla. Este fenómeno se denomina ruptura *espontánea* de simetría, para distinguirla de la ruptura de simetría descrita por Wigner y Weyl, en la que simplemente se agrega un término que no respeta la simetría a las ecuaciones. Aquí no añadimos nada.

Las ideas de Nambu permean numerosas áreas de la física. Además de la teoría de las partículas fundamentales, las aplicó a los imanes, los cristales y los superconductores. Pero fue al estudiar uno de sus modelos de física de partículas cuando se topó con una sorpresa. Hacia los años veinte del siglo XX, el físico indio Satyendra Nath Bose introdujo un tipo de estadística que debían obedecer algunas partículas, como los mesones pi y *K*. Bose aplicó sus ideas a los fotones y envió el artículo a Einstein, quien sugirió algunas correcciones y consiguió que se publicase. En honor a Bose, las partículas que obedecen esta estadística se denominan hoy *bosones*. La otra clase de partículas, entre las que se cuentan el electrón, el protón y el neutrino, reciben el nombre de *fermiones*, por Fermi.

La sorpresa con la que se encontró Nambu resultó ser un bosón de masa nula. En aquel momento se sabía que los fotones carecían de masa. Y se pensaba que también los neutrinos tenían masa nula (una suposición que años más tarde se demostraría falsa). Sin embargo, no se conocía, ni entonces ni ahora, ningún bosón del tipo predicho por Nambu. Al principio se pensó que quizá todo se debiese a un artificio de su mo-

delo. Pero, en 1961, el físico británico Jeffrey Goldstone halló en otro modelo la misma clase de partículas, hoy conocidas como bosones de Nambu-Goldstone. Todo el mundo comenzó a pensar que dichos bosones constituían una plaga ubicua en todo proceso de ruptura espontánea de simetría. De ser así, el fenómeno carecería de relevancia en el campo de la física de partículas elementales.

El gran avance llegó en 1964 de la mano de Walter Gilbert, profesor de biofísica en Harvard, cofundador de la empresa de biotecnología Biogen y ganador en 1980 del premio Nobel de química. Los argumentos de Nambu y Goldstone eran correctos, pero no lo suficientemente generales. Gilbert analizó las premisas de sus trabajos y se percató de que el electromagnetismo no las satisfacía. Aquello supuso una auténtica liberación para los físicos teóricos. El primero en explotarla por completo, al menos sobre el papel, fue el físico británico Peter Higgs. Este consideró un modelo que describía la interacción entre un fotón de masa nula y otros bosones. La teoría presentaba cierta simetría. Esta se rompía de manera espontánea y, entonces, ocurría el milagro: el fotón se volvía masivo y aparecía un bosón *con* masa, hoy universalmente conocido como bosón de Higgs. Hay que ver los detalles matemáticos para creerlo.

El primero en aplicar esas ideas con éxito fue Steven Weinberg. Para explicar sus logros, hemos de retroceder algo en el tiempo. Desde un punto de vista muy general, en la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales. La interacción fuerte mantiene a los quarks confinados en partículas como el protón mediante el intercambio de gluones. La siguiente en intensidad es el electromagnetismo, en el que partículas dotadas de carga eléctrica intercambian fotones. Pospondremos la discusión sobre las interacciones débiles (las siguientes en intensidad) para mencionar la más débil de todas: la gravedad. En este caso se intercambian gravitones, los cuales jamás han sido observados y que, según algunos investigadores, jamás se detectarán. Puede parecer paradójico que la gravedad aparezca como la fuerza menos intensa de todas, ya que nosotros la experimentamos de manera constante. Pero ello se debe a que ejerce solo efectos atractivos, por lo que siempre se suman. Gracias a ello, la Tierra nos mantiene con los pies en el suelo.

Las interacciones débiles causan, entre otros fenómenos, la desintegración beta. Fermi intentó basarse en el electromagnetismo para modelizarla, pero introdujo una modificación de gran calado: las partículas transmisoras de su teoría poseían, de manera efectiva, una masa infinita. Ello implicaba que la fuerza presentaba un alcance nulo, por lo que, para interaccionar, las partículas debían superponerse. La teoría parecía funcionar bien, pero desentonaba con el resto de las interacciones, en las que las partículas mediadoras tenían masas razonables. De modo que se propusieron nuevas partículas que mediasen en la interacción débil. Su masa debía ser muy elevada, pero finita. Había tres: dos con carga eléctrica, denominadas bosones *W* (por *weak*, «débil» en inglés) y una neutra, a la que se llamó bosón *Z* por razones menos claras. Ambas clases de partículas fueron detectadas en 1983: su masa resultó ser unas 90 veces la del protón. Los físicos ya habían supuesto que existirían y habían elaborado teorías sobre ellas con las que llevaban trabajando muchos años. Sin embargo, aquellos modelos adolecían de un problema muy serio: predecían resultados infinitos que no se dejaban tratar con las técnicas de renormalización, las mismas que permitían eliminar los infinitos en electrodinámica cuántica. La situación era desesperante hasta que llegó Weinberg.

La teoría de las interacciones electrodébiles de Weinberg empieza con una situación simétrica en la que ni los fotones ni los bosones que median las interacciones débiles tienen masa. Estos interaccionan con otros bosones, de manera análoga a como sucedía en el modelo de Higgs. Entonces, la simetría se rompe espontáneamente y el milagro sucede de nuevo: los bosones que median las interacciones débiles adquieren masa, el bosón de Higgs también, pero el fotón no. Además, los infinitos se vuelven tratables. Todo encaja como las piezas de un reloj suizo, pero deja abierta una cuestión: ¿dónde está el bosón de Higgs?

Nunca la física ha invertido tanto tiempo y dinero en una cacería similar. Hemos emprendido un largo viaje desde los tiempos de Rutherford, que descubrió el núcleo atómico con un experimento que cabía en una mesa de laboratorio. Tres gigantescos aceleradores han participado en la búsqueda, dos de ellos en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN). El más antiguo de los aceleradores del CERN, el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP), ha sido desmantelado. Nos enseñó que, en caso de existir, el bosón de Higgs debía tener una masa 120 veces mayor que la del protón. Sin embargo, no halló pruebas de su existencia. Los experimentos del Tevatrón del Fermilab, cerca de Chicago, hoy también clausurado por falta de fondos, mejoraron esa cota en unos tantos por ciento. Los teóricos han presentado argumentos convincentes sobre el valor máximo permitido para la masa del bosón de Higgs. Las posibilidades que quedan se encuentran al alcance del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el flamante acelerador del CERN.

Si el LHC confirma la existencia del bosón de Higgs, marcará el punto final de un largo capítulo de la física teórica. La historia me recuerda a la de un compañero francés. Cierto parámetro había sido bautizado con su nombre, por lo que aparecía con bastante frecuencia en las discusiones sobre las interacciones débiles. Al final, el parámetro fue medido y el modelo confirmado en los experimentos. Sin embargo, cuando fui a felicitarle, lo hallé entristecido porque ya no se hablaría más de su parámetro. Si el bosón de Higgs no apareciese, la situación se tornaría muy interesante, puesto que nos veríamos ante imperiosa necesidad de inventar nueva física.

No creo que demasiados colegas de profesión coincidan conmigo en este último punto. Me recuerda a la historia de Einstein cuando recibió el telegrama en el que se le comunicó que acababan de medir la curvatura de la luz al pasar cerca del Sol, tal y como predecía su teoría de la relatividad general. Lleno de alegría, se lo mostró a Ilse Rosenthal-Schneider, una de sus estudiantes. Ella le preguntó cuál habría sido su reacción si la noticia hubiese sido la contraria. *«Da könnt' mir halt der lieber Gott leid tun. Die Theorie stimmt doch»*, contestó Einstein: «Entonces podría haberlo sentido por nuestro querido Dios. La teoría es correcta».

PARA SABER MÁS

La cebolla cósmica: Los quarks y la naturaleza del universo. F. E. Close. Editorial Crítica, 1988.
Quantum Leaps. J. Bernstein. Harvard University Press, 2009.
Neutrino. F. E. Close. Oxford University Press, 2010.
The infinity puzzle: Quantum field theory and the hunt for an orderly universe. F. E. Close. Basic Books, Nueva York, 2011.
The quantum story: A history in 40 moments. J. E. Baggot. Oxford University Press, Nueva York, 2011.

BOTÁNICA

EL OLFATO DE LAS PLANTAS

Los botánicos empiezan a tener un atisbo de la forma en que las plantas se huelen unas a otras. Algunas reconocen por el olor a sus vecinos atacados; otras son capaces de oler una comida

Daniel Chamovitz

CUSCUTA PENTAGONA NO ES UNA PLANTA NORMAL. SE TRATA DE UNA ENREDADERA DELGADA DE color naranja que puede crecer hasta tres metros de altura; produce pequeñas flores blancas de cinco pétalos y se encuentra en toda América del Norte. Lo que es único en *Cuscuta* es que no tiene hojas. Y no es de color verde, ya que carece de clorofila, el pigmento que absorbe la energía solar y permite que las plantas conviertan la luz en azúcares y oxígeno mediante la fotosíntesis. *Cuscuta* obtiene su comida de sus vecinos. Es un parásito. Para vivir, se une a una planta huésped y chupa los nutrientes proporcionados por el anfitrión taladrando un apéndice en su sistema vascular. Lo que hace de *Cuscuta* un organismo verdaderamente fascinante es que tiene preferencias culinarias: elige a qué vecinos atacar.

Adaptado de What a plant knows: A field guide to the senses *(«Qué sabe una planta: Guía de campo de los sentidos»), por Daniel Chamovitz, por acuerdo con Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC. Copyright © 2012 Daniel Chamovitz.*

Una semilla de *Cuscuta* germina igual que la de cualquier otra planta. El nuevo brote crece en el aire y la nueva raíz se hunde en la tierra. Pero una *Cuscuta* joven abandonada a sí misma va a morir si no encuentra rápidamente un anfitrión del cual vivir. Cuando la plántula de *Cuscuta* crece, mueve la punta del brote en pequeños círculos, explorando los alrededores de la misma forma en que lo hacemos con nuestras manos cuando estamos con los ojos vendados o buscamos la luz de la cocina en medio de la noche. Aunque estos movimientos parecen aleatorios en un primer momento, si la cuscuta se halla al lado de otra planta (por ejemplo, una tomatera), pronto se hace evidente que crece, se curva y se inclina en la dirección de la planta de tomate que le proporcionará alimento. Lo hace hasta que encuentra una hoja de tomatera. Pero en lugar de



CHERIE SINNEN

Fragancia fatal. Después de oler su camino hacia un huésped adecuado, una enredadera parásita del género *Cuscuta* se enrosca alrededor de una planta de tomate, chupando sus jugos vitales.

tocar la hoja, se hunde y se sigue moviendo hasta que da con el tallo de la planta. En un acto final de victoria, se enrosca alrededor del mismo, envía microproyecciones en el floema del tomate (los vasos que llevan la savia azucarada de la planta) y empieza a bombear azúcares que la mantendrán creciendo y la harán al final florecer.

Consuelo de Moraes, de la Universidad estatal de Pensilvania, incluso ha documentado este comportamiento en una película. El principal interés de esta entomóloga es la comprensión de la señalización de productos químicos volátiles entre los insectos y las plantas, y entre las propias plantas. Uno de sus proyectos se centró en averiguar el modo en que localiza la cuscuta a su presa. Demostró que las plantas de cuscuta nunca crecían hacia macetas vacías o con plantas artificiales. Lo hacían siempre hacia las plantas de tomate, no importaba donde las colocara: a la luz, a la sombra, donde fuera. La hipótesis de De Moraes es que la cuscuta en realidad olía el tomate. Para comprobarlo, ella y sus estudiantes pusieron la cuscuta en una maceta dentro de una caja cerrada y la tomatera en una segunda caja también cerrada. Las dos cajas estaban conectadas por un tubo que entraba por un extremo en la caja de la cuscuta, lo que permitía el libre flujo de aire entre las cajas. La cuscuta, aun aislada, crecía siempre hacia el tubo, lo que sugería que la tomatera desprendía un olor que flotaba a través del tubo hacia la caja de la cuscuta, y que a esta le gustaba.

Si la cuscuta realmente estaba persiguiendo el olor del tomate, quizá De Moraes podría elaborar sencillamente un «*eau* de tomate» y ver si la cuscuta iría en su búsqueda. Preparó el perfume con los tallos de la tomatera y empapó con este torundas de algodón, que colocó sobre palillos en macetas junto a la cuscuta. A modo de control, puso en otras torundas de algodón algunos de los disolventes que utilizó para preparar el elixir de tomate y los colocó en otras macetas. Como predijo, engañó a la cuscuta haciéndola crecer hacia el algodón que desprendía el olor a tomate pensando que iba a encontrar comida, no hacia el que contenía los disolventes.

Entre un tomate y el trigo, la cuscuta elegirá el tomate. Si se cultiva en un punto equidistante entre las dos macetas, una con el trigo, otra con el tomate, este parásito vegetal irá a por el tomate.

En un nivel químico básico, el «perfume» de tomate y el de trigo son bastante parecidos. Ambos contienen betamirceno, un compuesto volátil (uno de los cientos de olores conocidos de composición química única) que por sí solo induce a la cuscuta a crecer hacia él. ¿Por qué la preferencia? Una hipótesis clara se basa en la complejidad del aroma. Además del betamirceno, el tomate emite otros dos productos volátiles por los que la cuscuta se siente atraída; el conjunto resulta en una fragancia irresistible para ella. El trigo, en cambio, contiene solo un olor atractivo para la cuscuta, el betamirceno, y no los otros dos que se encuentran en el tomate. Es más, el trigo no solo fabrica menos productos atrayentes, sino que también produce acetato de (Z)-3-hexenilo, que repele a la cuscuta más de lo que la atrae el beta-mirceno. De hecho, la cuscuta se aparta del acetato de (Z)-3-hexenilo acetato; el trigo le resulta repulsivo.

EN SÍNTESIS

Las plantas liberan a su alrededor un conjunto de olores y responden a los perfumes de las demás.

Algunas plantas se preparan para la batalla cuando huelen plantas vecinas heridas, mientras que la cuscuta parasitaria olfatea huéspedes sanos.



Daniel Chamovitz es director del Centro Manna para las Ciencias Vegetales en la Universidad de Tel Aviv.

ESPIONAJE

En 1983 dos equipos publicaron unos descubrimientos asombrosos relacionados con la comunicación de las plantas que revolucionaron nuestra comprensión de todo el mundo vegetal, desde el sauce hasta las judías. Los científicos afirmaron que los árboles se advertían unos a otros de un inminente ataque de insectos fitófagos. La noticia de su trabajo pronto se extendió a la cultura popular, con la idea de «árboles parlantes» que apareció en las páginas no solo de la revista *Science*, sino también de los principales periódicos de todo el mundo.

David Rhoades y Gordon Orians, de la Universidad de Washington, se dieron cuenta de que las orugas tenían menos probabilidades de alimentarse de las hojas de los sauces si estos árboles eran vecinos de otros sauces ya infestados con orugas de esa especie. Los árboles sanos que crecían cerca de los infestados eran resistentes a las orugas porque, como descubrió Rhoades, sus hojas (pero no las de los árboles infestados) contenían productos fenólicos y taninos que las hacían incomibles para los insectos. Debido a que los investigadores no detectaron ninguna conexión física entre los árboles dañados y sus vecinos sanos (no compartían raíces y sus ramas no se tocaban), Rhoades concluyó que los individuos atacados estaban enviando a los árboles sanos un mensaje aéreo mediante feromonas. En otras palabras, los árboles infestados enviaban una señal a los vecinos sanos, «¡Cuidado! ¡Defendeos!».

Apenas tres meses más tarde, Ian Baldwin y Jack Schultz, de la Universidad de Dartmouth, publicaron un artículo fundamental que apoyaba el informe de Rhoades. Estudiaron plantas jóvenes (de unos treinta centímetros) de álamo y arce cultivadas en cajas herméticas de plexiglás. Utilizaron dos cajas para su experimento. La primera contenía dos poblaciones de árboles: 15 con dos hojas partidas por la mitad y otros 15 no dañados. La segunda caja contenía los árboles de control, que por supuesto no fueron dañados. Dos días después, las restantes hojas de los árboles dañados, así como las hojas de los árboles no dañados en la misma caja, contenían niveles elevados de varias sustancias que se sabe que inhiben el crecimiento de las orugas. Los árboles en la caja de control no mostraron aumentos en ninguno de estos compuestos. Baldwin y Schultz sugirieron que las hojas dañadas, ya fuera por desgarro (como en sus experimentos) o por el ataque de insectos (como en las observaciones de Rhoades sobre los sauces), emitían una señal gaseosa que permitió a los árboles dañados comunicarse con los no dañados, lo que resultó en la preparación de estos últimos para defenderse de un inminente ataque de insectos.

Esos primeros informes de la señalización de las plantas fueron con frecuencia menospreciados por otros miembros de la comunidad científica por carecer de los controles adecuados o por presentar resultados correctos pero cuyas consecuencias se

habían exagerado. Sin embargo, en el último decenio el fenómeno de la comunicación de las plantas a través del olfato se ha demostrado una y otra vez para un gran número de plantas, incluida la cebada, la artemisa y el aliso. Si bien la influencia entre plantas vecinas a través de señales químicas aéreas constituye hoy un paradigma científico aceptado, la pregunta sigue siendo: ¿se comunican realmente las plantas unas con otras (para advertir, a propósito, de algún peligro inminente) o simplemente las plantas sanas escuchan un soliloquio de las infestadas, no destinado a ser escuchado?

Martin Heil y su equipo del Centro de Investigación y Estudios Avanzados de Irapuato, México, han estado estudiando judías silvestres (*Phaseolus lunatus*) en los últimos años para hallar la respuesta a esa pregunta. Heil sabía que los científicos habían observado que cuando una planta de judía es devorada por escarabajos, responde de dos maneras. Las hojas que están siendo devoradas por los insectos liberan al aire una mezcla de sustancias volátiles; las flores (aunque no son atacadas directamente por los escarabajos) producen un néctar que atrae a otros artrópodos devoradores de escarabajos. Anteriormente, en el cambio de milenio, Heil había trabajado en el Instituto Max Planck de Química Ecológica en Jena, el mismo instituto que dirigía —y dirige— Baldwin; y como Baldwin antes que él, Heil se preguntaba por qué emitía esos compuestos la planta de judía.

Heil y sus colabodadores colocaron plantas de judía que habían sido atacadas por escarabajos al lado de otras plantas que habían sido aisladas de los escarabajos y supervisaron el aire alrededor de las hojas. Escogieron cuatro hojas: dos de una planta que había sido atacada por los escarabajos; una de una planta vecina no atacada; y otra hoja de una planta que habían mantenido aislada de escarabajos o de plantas infestadas. Identificaron los compuestos volátiles en el aire alrededor de cada hoja mediante una técnica avanzada llamada cromatografía/espectrografía de masas (aparece a menudo en la serie CSI y es utilizada por los fabricantes de perfume cuando desarrollan una nueva fragancia).

Heil encontró que el aire emitido desde las hojas devoradas y las sanas en la misma planta contenían compuestos volátiles esencialmente idénticos, mientras que el aire alrededor de la hoja de control estaba limpio de estos gases. Además, el aire que rodeaba las hojas sanas de las judías vecinas de las plantas infestadas también contenía los mismos productos volátiles que los detectados en las plantas comidas. Las plantas sanas también eran menos propensas a ser comidas por escarabajos.

Pero Heil no estaba convencido de que las plantas dañadas «hablaran» a otras plantas para advertirles contra el ataque inminente. Sugirió que la planta vecina más bien estaba practicando una forma de espionaje olfativo de una señal interna que en realidad iba dirigida a otras hojas en la misma planta.

Heil modificó la configuración de su experimento de una forma sencilla, si bien ingeniosa, para comprobar su hipótesis. Mantuvo las dos plantas una junto a la otra, pero encerró las hojas atacadas en bolsas de plástico durante 24 horas. Cuando revisó los mismos cuatro tipos de hojas del primer experimento, obtuvo resultados distintos: aunque la hoja atacada continuaba emitiendo la misma sustancia que antes, las otras hojas en la misma planta y sus vecinas se parecían ahora a la planta de control; el aire a su alrededor estaba limpio.

Heil y su equipo abrieron la bolsa que cubría la hoja de ataque y, con la ayuda de un ventilador pequeño como los que se usan para facilitar la refrigeración de ordenadores, soplaron aire en una de dos direcciones: o bien hacia las hojas vecinas más arriba de la planta, o lejos de la planta y hacia fuera. Comprobaron los gases que salían de las hojas más altas en el tallo y midieron la cantidad de néctar que producían las plantas. Las hojas sopladas con aire tomado de la hoja atacada comenzaron a emitir los mismos gases ellas mismas y las flores produjeron néctar. Las hojas que no fueron expuestas al aire de la hoja atacada siguieron igual.

Los resultados fueron significativos porque revelaron que los gases emitidos desde una hoja atacada eran necesarios para que la misma planta protegiera a sus otras hojas de agresiones futuras. En otras palabras, cuando una hoja es atacada por un insecto o bacterias, libera olores que advierten a sus hojas hermanas para que se protejan contra un peligro cercano, de forma similar a los fuegos que se encendían en las torres de la Gran Muralla china para advertir de un asalto inminente.

Entre una tomatera y algunas plantas de trigo, la cuscuta elegirá la primera

Las plantas vecinas se espían unas a otras en una conversación olfativa que les proporciona información esencial para protegerse. En la naturaleza, esta señal olfativa persiste durante al menos unos pocos metros (diferentes señales volátiles, en función de sus propiedades químicas, viajan a distancias más cortas o mucho más largas). Para las judías, a quienes les gusta crecer apiñadas, esto es más que suficiente para asegurar que si una planta tiene problemas, sus vecinas lo sabrán.

¿HUELEN LAS PLANTAS?

Las plantas desprenden una auténtica batería de olores. Imaginemos la fragancia de las rosas cuando paseamos por un jardín en verano, de la hierba recién cortada al final de la primavera, o del jazmín en flor durante la noche. Sin mirar, sabemos cuándo la fruta está lista para comer, y ningún visitante de un jardín botánico puede ser ajeno al olor repugnante de la flor más grande (y más pestilente) del mundo, *Amorphophallus titanum*, más conocida como flor de cadáver. (Por suerte, florece una sola vez cada pocos años.) Muchos de estos aromas se utilizan en la compleja comunicación entre plantas y animales. El olor induce a los polinizadores a visitar las diferentes flores y a los diseminadores de semillas a visitar las frutas; tal como señala Michael Pollan, periodista especializado en ciencias naturales y ambientales, estos aromas pueden incluso seducir a la gente para difundir las flores por todo el mundo.

Pero las plantas no solo emiten olores; como hemos visto, también huelen a otras plantas. Obviamente, no poseen nervios olfatorios conectados a un cerebro que interprete las señales. Sin embargo, *Cuscuta*, las plantas de Heil y el resto de la flora en nuestro medio natural responden a las feromonas, al igual que nosotros. Las plantas detectan una sustancia volátil en el aire y convierten esta señal (pese a carecer de nervios) en una respuesta fisiológica. Sin duda, ello podría considerarse un sentido del olfato.

por Akira Kuwata y Alícia Duró

Parmales y diatomeas, ¿primas hermanas?

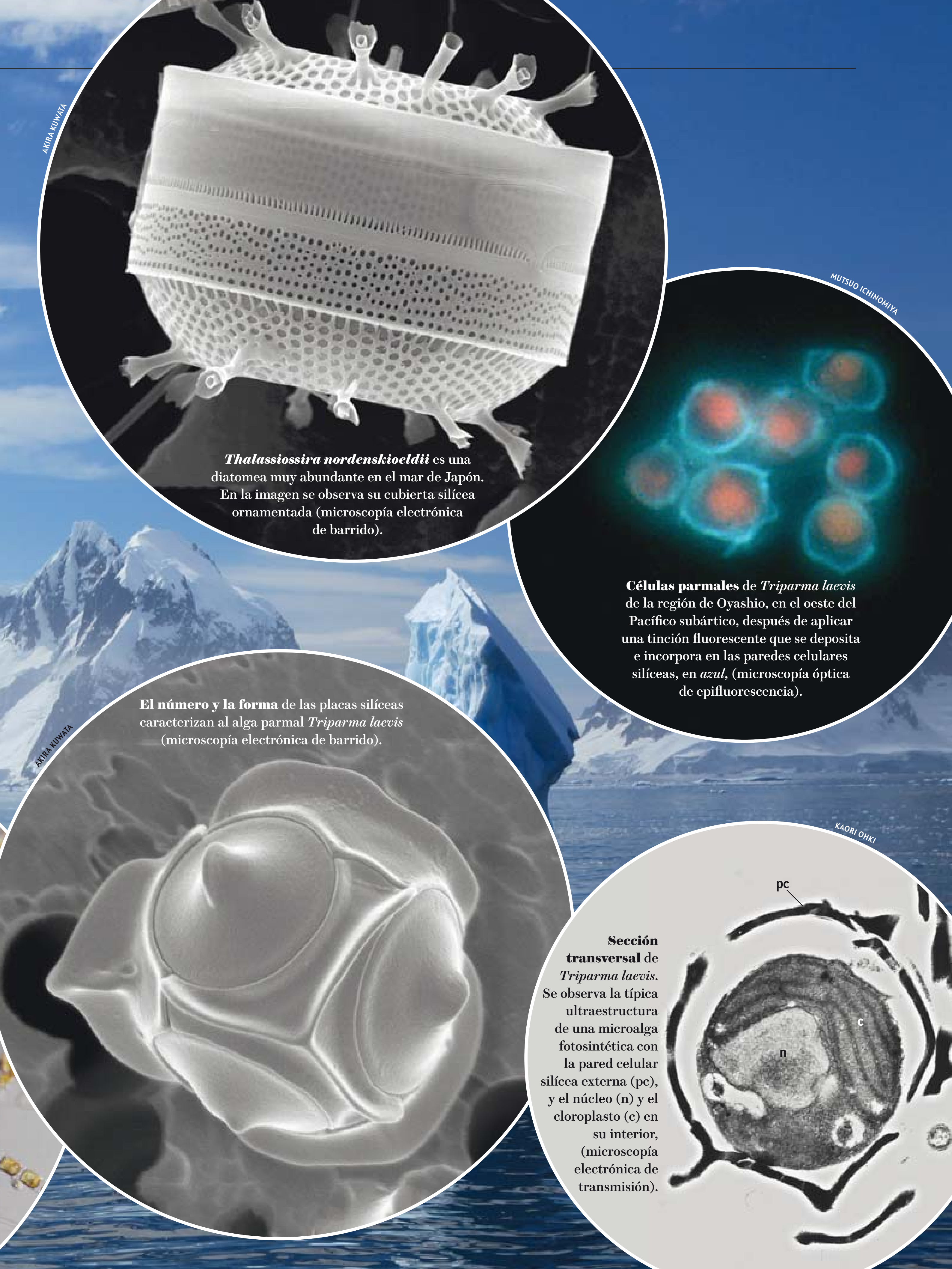
Una nueva técnica con tinción fluorescente permite aislar las algas parmales y establecer su relación evolutiva con las diatomeas

Las diatomeas son el grupo fitoplanctónico evolutivamente más exitoso, con una diversidad muy elevada (unas 10^5 especies) y responsables de alrededor del veinte por ciento de la fotosíntesis de la Tierra. En 1976, Tsuneo Iwai, del instituto de secundaria Muro en Toyohashi, y Shiro Nishida, de la Universidad de Educación de Nara, describieron unas algas marinas diminutas similares a las diatomeas en cuanto a su estructura celular, pared celular silícea y pigmentos fotosintéticos. Pero no fue hasta 1987 cuando Beatrice Booth, de la Universidad de Washington, y Harvey Marchant, de la División Antártica Australiana, determinaron que se trataba de un nuevo orden: las parmales. A diferencia de las diatomeas, de mayor tamaño (superior a las 20 micras), las parmales son células muy pequeñas (de 2 a 5 micras de diámetro) y solitarias que poseen paredes celulares silíceas compuestas de cinco a ocho placas. Presentan una amplia distribución oceánica y proliferan, sobre todo, en las aguas polares y subpolares, donde constituyen un grupo importante de productores primarios.

Sin embargo, debido a su reducido tamaño, las algas parmales solo se habían descrito en muestras recolectadas y examinadas bajo el microscopio electrónico. Pero no se habían realizado estudios genéticos y, por consiguiente, quedaba por esclarecer su relación evolutiva con las diatomeas. Ahora, mediante un trazador fluorescente que se deposita e incorpora en la pared silícea, se han aislado y cultivado estas algas en el laboratorio. El análisis posterior de las células, que incluye el estudio de su ultraestructura, composición en pigmentos y filogenia molecular, indica una relación evolutiva muy estrecha entre las parmales y las diatomeas. En el futuro, la aplicación de esta técnica de aislamiento puede ayudar a descubrir otras especies de parmales y establecer su diversidad, lo que permitirá conocer mejor la función que ejerce este grupo en los procesos oceánicos.



Distintas especies de diatomeas en una muestra de agua de mar de la bahía de Tokio (microscopía óptica).



Thalassiossira nordenskioeldii es una diatomea muy abundante en el mar de Japón. En la imagen se observa su cubierta silícea ornamentada (microscopía electrónica de barrido).

Células parmales de *Triparma laevis* de la región de Oyashio, en el oeste del Pacífico subártico, después de aplicar una tinción fluorescente que se deposita e incorpora en las paredes celulares silíceas, en *azul*, (microscopía óptica de epifluorescencia).

El número y la forma de las placas silíceas caracterizan al alga parmal *Triparma laevis* (microscopía electrónica de barrido).

Sección transversal de *Triparma laevis*. Se observa la típica ultraestructura de una microalga fotosintética con la pared celular silícea externa (pc), y el núcleo (n) y el cloroplasto (c) en su interior, (microscopía electrónica de transmisión).

por Ana Rosa Pérez Ransanz

Ana Rosa Pérez Ransanz es investigadora en el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la Universidad Nacional Autónoma de México.



¿Ciencia sin emociones?

Los sentimientos de asombro, duda o curiosidad operan como poderosos motores de la investigación

La mala reputación que han tenido las emociones ha predominado a lo largo de la historia de la filosofía. Ya Demócrito (siglos V-IV a.C.) afirmaba que «la medicina cura las enfermedades del cuerpo, la sabiduría libera al alma de las emociones». Y como es sabido, la máxima de que «la razón debe dominar a la pasión» ha sido la principal guía filosófica para decidir sobre nuestras acciones y creencias. Pero incluso cuando se ha invertido la relación de dominación, como en el caso de David Hume (1711-1776), quien sostuvo que «la razón es, y deber ser, esclava de las pasiones», se sigue manteniendo una oposición irreconciliable entre sentir y pensar, entre lo afectivo y lo cognitivo.

Contra el telón de fondo de esa longeva tradición, donde la dicotomía razón-emoción viene acompañada de los dualismos mente-cuerpo y cultura-naturaleza, destaca el movimiento de los pragmatistas clásicos, encabezado por Charles S. Peirce (1839-1914), William James (1842-1910) y John Dewey (1859-1952). Estos científicos-filósofos emprendieron una indagación que justo comenzaba por cuestionar las dicotomías de la filosofía tradicional, con el fin de comprender y restaurar los vínculos que integraban las esferas más básicas de la vida humana: las del conocimiento, la moral y el arte. Para llevar adelante este programa innovador, los pragmatistas forjaron una noción de experiencia anclada en la acción, que permitía vincular lo cognitivo y lo afectivo de una manera muy natural. Fue así como se abrió el camino para analizar el papel de las emociones en la obtención de conocimiento, incluido el conocimiento científico.

En ese programa, la experiencia, lejos de reducirse a lo meramente sensorial (*sense data*), se concibe como una relación activa entre el ser humano y su entorno físico y social. En su obra *Experience and nature* (1925-1929), Dewey sustenta que la experiencia es fundamentalmente *interacción con el entorno*, por lo cual toda forma de acción y de sentimiento cae bajo la categoría de experiencia. Y dado que el ser humano es primariamente una criatura que siente y actúa (reacciona), si queremos entender la naturaleza del pensamiento debemos reconocer que los procesos cognitivos emergen en el contexto de una interacción inmediata con el mundo. En breve, el sentir y el hacer establecen las condiciones que hacen posible el pensar.

Dewey argumenta que la ciencia entendida como actividad generadora de conocimientos es mucho más básica que la ciencia entendida como cuerpo de contenidos. El análisis del proceso de conocer tiene prioridad frente al análisis de sus productos, dado que la ciencia requiere de estrategias de intervención y manipulación de los hechos para construir y poner a prueba sus teorías. Y en relación con esta idea, Dewey introduce otra tesis novedosa: el proceso de conocer involucra, de manera necesaria, elementos de la esfera afectiva. Tesis que rompe de entrada con la rancia dicotomía entre lo afectivo y lo cognitivo.

En su análisis de la experiencia emocional, Dewey se apoya tanto en la teoría de la evolución de Darwin como en la psicología experimental de James. Del primero toma el valor de supervivencia que tiene la conducta emocional; del segundo, el aspecto de las perturbaciones fisiológicas que acompañan a los estados emocionales. Pero Dewey agrega un elemento propio: el papel crucial que desempeña la actividad de resolución de problemas en nuestro desarrollo personal. Desde que nacemos, los humanos nos enfrentamos a situaciones de conflicto o de incertidumbre que hemos de resolver. Es así tanto para el científico que mediante una hipótesis debe dar cuenta de un cúmulo de



ELOGIO AL HORIZONTE, DE EDUARDO CHILLIDA/WIKIMEDIA COMMONS/ROBERTO SUEIRAS REVUELTA/CC BY-SA 3.0

datos, como para la persona que se enfrenta a un conflicto moral y debe decidir el curso de su acción. De aquí que las emociones, en tanto formas de relacionarnos con el entorno, no puedan ser reducidas a las alteraciones fisiológicas que las acompañan ni a las expresiones emocionales del lenguaje corporal. Estos componentes son importantes, pero el rasgo central de las experiencias emocionales —según Dewey— es que nos predisponen a actuar de cierta manera ante situaciones determinadas, lo cual pone de manifiesto que en las experiencias afectivas se ponen en juego tanto sensaciones como creencias y valoraciones.

Dewey trazó el camino hacia una concepción de las emociones sorprendentemente actual. Sin embargo, dicha línea de investigación cayó en el olvido durante la primera mitad del siglo xx. Los filósofos de la ciencia se concentraron en el análisis de las teorías y se ocuparon exclusivamente de los aspectos sensoriales de la experiencia, dado su interés en caracterizar la base empírica del conocimiento. Las emociones pasaron a considerarse algo meramente subjetivo, sin ningún valor para la investigación científica.

La rehabilitación de las emociones llega en la década de los cincuenta del siglo xx, cuando los filósofos de la ciencia focalizan su atención en los procesos de producción de conocimiento. Con este giro hacia la praxis, autores como Polanyi, Hanson, Kuhn y Feyerabend asumen una noción de experiencia muy cercana a la de los pragmatistas clásicos, devolviéndole su carácter activo y prospectivo en la investigación. En este contexto, destaca el libro del químico y filósofo Michael Polanyi, *Personal knowledge* (1958), donde el autor elabora una teoría de las emociones de corte pragmatista.

Polanyi sostiene que las «pasiones intelectuales» cumplen funciones indispensables en la obtención de conocimiento, entre ellas la función selectiva, ya que las emociones nos indican qué es lo relevante para la investigación. Otra función central es la heurística, que se halla en la base de todo proceso creativo, de descubrimiento o de innovación, orientando la resolución de problemas. Esta pasión intelectual desempeña un papel decisivo en los procesos de cambio revolucionario, ya que nos permite cruzar el vacío conceptual que media entre el problema y el descubrimiento. En palabras de Polanyi: «Los grandes hallazgos cambian nuestro marco interpretativo. Por tanto, es lógicamente imposible lograr este cambio mediante una aplicación reiterada de nuestro marco interpretativo previo. Así, una vez más, constatamos que el descubrimiento es creativo, en el sentido de que no podría haberse logrado mediante una diligente aplicación de ningún procedimiento previamente conocido». Entonces, las emociones que posibilitan y promueven la innovación son constitutivas del desarrollo racional de la ciencia, ya que la sensibilidad a lo que resulta relevante está estrechamente imbricada con la actividad crítica y autocorrectiva.

El proceso de conocer involucra, de manera necesaria, elementos de la esfera afectiva

En el campo de la epistemología cognitiva, que comenzó a desarrollarse en los años ochenta del siglo pasado, destaca la defensa que hace Ronald de Sousa del carácter racional de las emociones. En *The rationality of emotions* (1987) desafía la tradición descalificadora de las emociones argumentando que estas le prestan una ayuda indispensable al razonamiento. Como apunta el filósofo británico Dylan Evans, algunos defensores de la concepción positiva llegan a sostener que: «permaneciendo todo lo demás igual, los seres humanos serían menos racionales en la medida en que carecieran de emoción». Para defender la tesis de que las emociones desempeñan una función crucial en los procesos de deliberación racional, De Sousa propone una hipótesis que constituye el núcleo de su teoría: las emociones aportan patrones de prominencia (*salience*), los cuales condicionan lo que cuenta como objeto de atención, como línea de búsqueda y como estrategia de inferencia. Esta hipótesis, a su juicio, da cuenta de las diversas formas en que las emociones posibilitan nuestro razonamiento acerca de qué creer y qué hacer.

En cualquier decisión afrontamos, en principio, un conjunto virtualmente infinito de consecuencias pensables, así como un número ilimitado de medios y de estrategias posibles. Si esto es así, ¿cómo puede un agente abarcar ese espacio abierto de posibilidades y elegir entre los innumerables medios y fines? La explicación, en breve, es que las emociones, al restringir el foco de atención, reducen drásticamente el espacio de búsqueda en la resolución de cualquier problema. Como dice De Sousa: «Las emociones delimitan el rango de información que el organismo tomará en consideración, las inferencias que de hecho realizará de entre un infinito potencial, así como el conjunto de opciones vivas de entre las cuales elegirá».

Por otra parte, la prueba empírica que proviene de las ciencias cognitivas presta un fuerte apoyo a esta tesis de que las emociones son portadoras de un contenido informativo muy básico, indispensable para que opere nuestro pensamiento deliberativo. Sin embargo, es un hecho indiscutible que las emociones no siempre operan en favor de la racionalidad. El poder que ellas tienen de controlar la atención, la relevancia de la información y las estrategias que deben serguirse, también puede bloquear los procesos de conocimiento. El problema reside, por tanto, en explicar cuándo las emociones operan en favor de la razón y cuándo la entorpecen.

Pero entonces, si aceptamos que las emociones nos indican qué es lo importante, si contribuyen a establecer los objetivos y los límites de toda deliberación, y si, además, consideramos que los «sentimientos epistémicos» como la duda, la convicción, la curiosidad o el asombro, operan como poderosos motores de la investigación, hemos de concluir que quien quiera comprender la actividad científica debe reconocer la injerencia de los elementos de nuestra vida afectiva en los procesos de conocimiento. De lo contrario, no podrá ir mucho más allá de lo que nos ha llevado la epistemología tradicional.

PARA SABER MÁS

Thinking about feeling: Contemporary philosophers on emotions. Dirigido por Robert C. Solomon. Oxford University Press, 2004.

Emotion, evolution and rationality. Dirigido por Dylan Evans y Pierre Cruse. Oxford University Press, 2004.

Epistemology and emotions. Dirigido por Georg Brun et al. Ashgate, 2008.

El papel de las emociones en la producción de conocimiento. Ana Rosa Pérez Ransanz en *Estudios Filosóficos*, vol. LX, n.º 173, págs. 51-64, 2011.

Emoción y razón. Sabine A. Döring en *Emociones*, Cuadernos de Mente y Cerebro n.º 2, 2012.

por Carlos Lacasta

Carlos Lacasta, experto en medicina nuclear, es investigador del Instituto de Física Corpuscular de la Universidad de Valencia y el CSIC.



La estela del Higgs

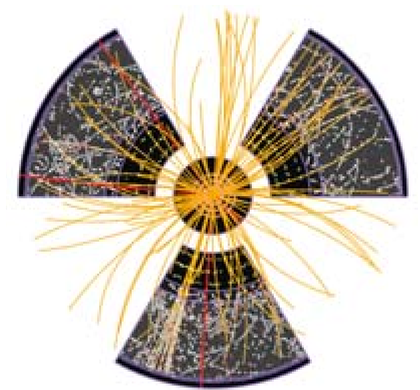
Los avances técnicos que cosecha la investigación en física de partículas redundan en beneficio de la medicina nuclear

El pasado 4 de julio, los físicos del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, anunciaron el descubrimiento de una nueva partícula. Esta parece seguir el guion de lo que para ellos es el modelo, o teoría, estándar y bien podría ser el bosón de Higgs: una perturbación del campo de Higgs o, de forma profana, del éter del siglo XXI que inunda lo que llamamos el vacío.

Es un momento histórico para la física de partículas en especial y para el conocimiento humano en general, ya que, tanto si se trata del Higgs como de cualquier otro bosón, la observación corresponde a un nuevo tipo de partícula o, incluso, de materia. Constituye, además, el último requerimiento del modelo estándar que reproducía, aunque sin explicarlos, casi todos los fenómenos que ocurren alrededor de las partículas elementales. Más allá de este bosón hay solo conjeturas, más o menos elegantes, y, por supuesto, todas las sorpresas que la naturaleza nos depare. Más acá, siempre nos queda preguntarnos si algún día podremos contestar como lo hizo Faraday al político que le preguntaba para qué servía la electricidad: «*Sir*, un día podrá usted gravarla con impuestos».

No creo que sea esa la respuesta que podamos dar hoy respecto a la utilidad de este avance científico. Pero tampoco podemos olvidar los casi cincuenta años que ha costado dar con la esquiva partícula desde que se postuló como mecanismo generador de la masa. Numerosos experimentos llevados a cabo en diversos aceleradores la han buscado. Pero solo en los dos últimos se pudo acotar la que, de existir, debía ser su masa si todo estaba dictado por la hasta ahora infalible «tiranía» del modelo estándar. Casi cincuenta años, de los cuales treinta se han dedicado a diseñar, desarrollar y construir el LHC y los grandes detectores que, operados por más de cinco mil científicos, han hecho posible este descubrimiento. Es en esta estela tecnológica que deja tras de sí medio siglo de investigación básica donde podemos hallar la respuesta al «¿para qué sirve?», sin olvidar la satisfacción que produce resolver los misterios del universo y saber que la humanidad, pese a todo, ha dado otro paso hacia adelante.

Uno de los campos que más puede beneficiarse de la «estela» del Higgs es el de la medicina nuclear. Sin sostener que la física nuclear y de partículas se halla detrás de los grandes avances en medicina nuclear, hay que reconocer que estas disciplinas han estado siempre muy ligadas. Sobre todo desde que, con los primeros aceleradores de partículas, empezaron a crearse los radioisótopos artificiales que se han venido empleando a modo de terapia y que, además, se hallan en la base de la obtención de los radiotrazadores, o radiofármacos. Estas sustancias constituyen la piedra angular de la obtención de imágenes para el diagnóstico oncológico. Se adhieren a regiones del cuerpo humano donde se llevan a cabo determinadas funciones metabólicas. Marcadas con un isótopo radiactivo que emita partículas, pueden emplearse para señalar las zonas del organismo afectadas por un tumor. Solo tenemos que ser capaces de detectar las partículas emitidas. Es precisamente eso, la detección de partículas, lo que se ha estado desarrollando, en la frontera de varias técnicas, durante la construcción de los detectores del LHC. Este conocimiento generado facilitará el diseño de detectores que permitan reconstruir imágenes con gran resolución y en tiempo real. El propósito es que estas imágenes de gran calidad puedan obtenerse incluso en presencia de campos magnéticos muy intensos; ello permitirá simultanear la imagen metabólica con la estructural y, por tanto, combinar estos métodos con resonancias magnéticas nucleares o tomografías axiales computerizadas (TAC) en tiempo real.



También cabe destacar los avances en radioterapia. La radiación ionizante constituye una de las armas disponibles para combatir el cáncer. Destruye el ADN de las células cancerígenas, especialmente sensibles a estos ataques, pero también daña, aunque en menor medida, las células normales. Se buscan, por tanto, otros métodos que no dañen las células que rodean los tumores tratados. Una de estas alternativas consiste en usar haces de hadrones, en concreto, de iones de átomos como el carbono o el hidrógeno (protones). Nos referimos a la hadronterapia. Estas partículas poseen una masa muy superior a la de los electrones o fotones que emplea la radioterapia tradicional. Y ofrecen una clara ventaja: depositan su energía de forma muy localizada, sin apenas dañar las zonas circundantes, ni siquiera las que atraviesan antes de liberar su «carga de profundidad». El CERN coordina una red europea de investigación sobre la hadronterapia que desarrolla los aceleradores proveedores de la radiación terapéutica, los bancos de tratamiento y las técnicas que permiten monitorizar el proceso en tiempo real, para asegurar que las partículas del haz depositan su energía en donde deben y no en otro sitio.

Si la Red nació en el CERN como consecuencia de la búsqueda de otro bosón, el *Z*, me gustaría pensar que la estela tecnológica que deja tras de sí el descubrimiento del nuevo bosón —quién sabe si el de Higgs— nos traerá, con paciencia, nuevas sorpresas y aplicaciones.

CERN (*colisión de partículas*)

por Pere Castells

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.



Cocinar con microondas

Una opción cada vez más habitual para las nuevas generaciones

Desde el descubrimiento del fuego, el ser humano ha utilizado el calor para cocinar; y lo ha hecho siempre de la misma forma: proporcionando temperatura externa. Esta transmisión térmica puede producirse de diversas formas (fuego directo, mediante agua calentada, vapor de agua, grasas, etcétera), pero siempre en una misma dirección: del exterior al interior. Ahora ya se puede hablar de un nuevo modo de calentar y, por tanto, de cocinar, que opera en todos los puntos de los alimentos.

Fue durante el curso de una investigación relacionada con el radar, alrededor de 1945, cuando Percy Spencer, ingeniero de Raytheon, notó algo muy peculiar. Estaba ensayando un nuevo tubo al vacío, llamado magnetrón, cuando descubrió que su dulce de chocolate se había derretido. Intrigado por si esas ondas habían afectado la barra de chocolate, Spencer hizo un experimento. Esta vez colocó cerca del tubo varias semillas de maíz para hacer palomitas y se alejó. Empezaron a moverse, cocerse, hincharse y brincar, esparciéndose por todo el laboratorio. Nacía el horno de microondas.

En principio, la nueva técnica se veía alejada de los hogares. Pero en los años setenta empezó a introducirse tímidamente en el mercado estadounidense. A finales de los ochenta, un 25 por ciento de las cocinas de EE.UU. contaban ya con microondas. Se calcula que casi el 90 por ciento de los hogares de EE.UU. y Europa occidental disponen hoy de este tipo de horno, con una evolución rapidísima en los últimos años en países como España.

Los microondas domésticos operan a frecuencias de 2450 MHz, entre el infrarrojo y las ondas de radio, y a una potencia de entre 500 y 1100 vatios. Consta de un tubo electrónico, el magnetrón, que transforma la energía eléctrica en ondas. Estas provocan un cambio de dirección de un campo eléctrico, unos 5 millones de veces por segundo, que da lugar a una vibración de las moléculas polares. Al moverse estas, se genera un rozamiento interno que calienta la sustancia. Lo habitual es que sea el agua la que vibre, por lo que se generan temperaturas de hasta 100 ºC; pero también pueden calentarse grasas, azúcares o alcoholes, lo que permite llegar a temperaturas superiores.

Una de las preocupaciones que ha despertado el uso culinario del microondas guarda relación con la pérdida de nutrientes y vitaminas que causa. ¿Es mayor que la debida a los métodos de cocción tradicionales? En 2006, Emilia Lešková y sus colaboradores, del centro de investigación Vyzkumny Ústav de Bratislava, publicaron en *Journal of Food Composition and Analysis* un trabajo de revisión sobre la estabilidad de las vitaminas en diferentes medios. Constataron que la cocción con microondas producía pérdida de vitaminas menor que el hervido y similar a la cocción al vapor.

También se ha estudiado el impacto energético de la nueva técnica. S. Lakshmi, del Instituto Central de Investigación Tecnológica de Alimentos en Mysore y del Instituto de Tecnología de Siddanga en Tumkur, y sus colaboradores publicaron en 2007 un artículo en *Journal of Food Engineering* que concluía que la cocción del arroz al microondas consumía menos energía que el hervido.

Debido a la gran utilización del microondas en las cocinas domésticas, en febrero de 2005 la Organización Mundial de la Salud publicó un documento en el que se indicaba que los microondas, utilizados según las instrucciones del fabricante, son seguros y convenientes para calentar y preparar alimentos para el consumo. Los alimentos cocinados en un horno de microondas son seguros y tienen el mismo valor nutritivo que los cocinados en un horno tradicional. La principal diferencia entre los dos métodos estriba en que la energía del microondas penetra más profundamente en el alimento y reduce el tiempo total de cocción. El informe también remarca la conveniencia de que los usuarios sigan las instrucciones de uso. Asimismo, la OMS, junto con la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante, evalúa constantemente la seguridad de las microondas —lo mismo que hace con las ondas de teléfonos móviles y otras.

Ya hace mucho tiempo que la cocina utiliza el microondas. Incluso el emblemático restaurante El Bulli empezó a utilizar este horno en 2004 para ensayar elaboraciones. En 2006 ofrecía en su menú un peculiar bizcocho de pistacho. Para elaborarlo, mezclaban pistachos verdes triturados (80 g), clara de huevo (125 g), yema (80 g), azúcar (80 g) y harina de trigo (20 g). Colaban la mezcla y, mediante un sifón que cargaban con gas de protóxido de nitrógeno, la abocaban en moldes. Bastaban 50 segundos de cocción en un microondas de 900 vatios a máxima potencia para obtener el bizcocho. Se servía acompañado de yogur natural y ralladura de limón.

Por otro lado, el microondas ofrece una forma fácil y segura de consumir platos preparados, lo que mejora la alimentación de las personas con pocas habilidades culinarias.

Nos hallamos ahora en los albores del uso generalizado del microondas en la cocina. Verduras, arroces, carnes, pescados, pasteles... prácticamente todo puede adaptarse a la nueva técnica. Numerosas empresas están creando productos y utensilios especialmente pensados para este tipo de cocción. Todavía falta, sin embargo, la cultura culinaria del microondas, que solo puede adquirirse con el tiempo. Pero vista la velocidad a la que la sociedad actual se adapta a los cambios, seguramente este tiempo será muy, muy corto.



FUNDACIÓN ALICIA

Valérie Chansigaud, historiadora de las ciencias ambientales, estudia el descubrimiento de la biodiversidad y el origen de los programas de conservación.



La preocupación por los recursos naturales

En 1948, la publicación de dos libros que exponían los peligros del crecimiento irracional hizo que gran parte de la población tomara conciencia de la complejidad de las cuestiones ambientales

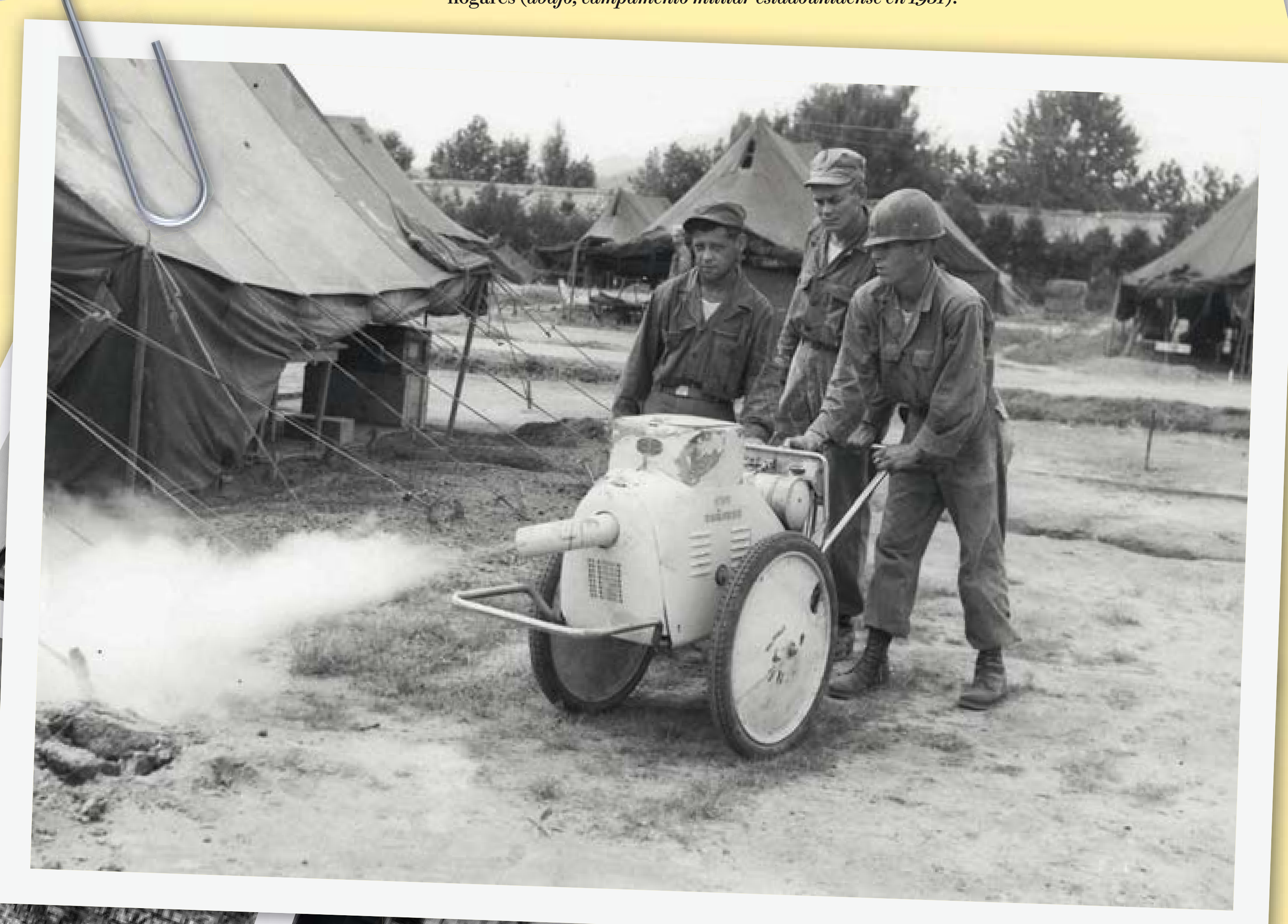
Valérie Chansigaud

El año 1948 estuvo marcado por la publicación de dos libros que se convirtieron rápidamente en *best sellers*. Sendos autores compartían un objetivo común: alertar a la opinión pública del agotamiento de los recursos naturales y del aumento desenfrenado de la población mundial, una combinación de fenómenos que amenazaba el futuro de la humanidad. Los temas tratados por ambos libros son similares a los de muchas obras actuales; pueden considerarse los precursores del pesimismo ambiental moderno y del debate sobre el agotamiento de los recursos, su uso sostenible y el decrecimiento.

El éxito fue enorme e internacional. *Road to survival*, del ecólogo estadounidense William Vogt (1902-1968), se publicó en español en 1952 con el título *Camino de supervivencia* y cuenta con otras diez traducciones. De *Our plundered planet* («Nuestro planeta esquilmado»), del director de un zoo estadounidense Henry Fairfield Osborn Jr. (1887-1969), se realizaron ocho impresiones solo en el año 1948 y se tradujo a una docena de idiomas. De veinte a treinta millones de personas leyeron estos libros; fueron los más vendidos sobre temas ambientales hasta la publicación, en 1962, de *Silent spring* («Primavera silenciosa»), de la bióloga estadounidense Rachel Carson (1907-1964). Su público traspasó los círculos científicos habituales y el contenido se trató en numerosos artículos, foros y secciones de correspondencia de revistas y diarios, así como en numerosos debates.

Con todo, ninguna de las dos obras constituye la encarnación de un pensamiento ambiental nuevo: desde principios del siglo xx, un gran número de científicos (naturalistas, geólogos y geógrafos) y políticos estadounidenses habían manifestado su preocupación por el futuro de los recursos naturales, cuya explotación, a la par que los residuos, aumentaba sin cesar. Frente a esta situación, los estudios disponibles eran dispares, escasos y de poca difusión en la sociedad. La gran fuerza de ambos libros estriba en haber reunido esos estudios y haber contribuido así a la popularización de las ideas ecologistas. ¿Quiénes fue-

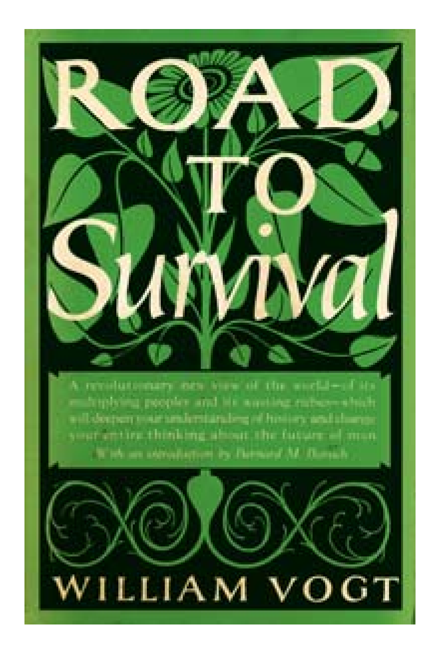
Una granja de Kansas devastada por la Gran Sequía en 1936 (*izquierda*). **Debido al uso intensivo de la tierra y a la sequía, esa gran erosión eólica de las vastas llanuras americanas obligó a numerosos agricultores a abandonarlo todo para huir de la hambruna. Los ecólogos estadounidenses William Vogt y Henry Osborn Jr. pasaron revista a ese desastre ambiental y se inquietaron por las consecuencias de prácticas posteriores, como el uso masivo del DDT, un insecticida con el que se fumigaban las cosechas y también los hogares (*abajo, campamento militar estadounidense en 1951*).**



BIBLIOTECA DEL CONGRESO, PRINTS & PHOTOGRAPHS DIVISION, FSA/OWI COLLECTION, LC-USF34-002505-E (*granja*); ARCHIVOS HISTÓRICOS OTIS DEL MUSEO NACIONAL DE SALUD Y MEDICINA DE EE.UU. (*DDT*)

ron sus autores? ¿Qué caminos les llevaron a escribirlos? ¿Cuáles eran sus mensajes y cómo fueron recibidos?

El abuelo de Osborn Jr. era un magnate del ferrocarril. El padre, Henry Fairfield Osborn (1857-1935), un paleontólogo famoso y partidario convencido de la eugenesia. En 1935, Osborn Jr. abandonó su carrera en el mundo de los negocios para dedicarse por entero a la Sociedad Zoológica de Nueva York y a su parque zoológico, ubicado en el Bronx. Continuó así la labor de su padre, uno de los fundadores de dicha sociedad, quien declaró en 1919: «Propagando el amor por los animales hemos conseguido miles, quizá millones, de nuevos amigos de la fauna salvaje. Ahora nos proponemos unirlos a todos en una gran campaña para la conservación».





Road to survival («Camino de supervivencia»), el best-seller publicado en 1948 por William Vogt _(fotografía)_, ornitólogo, ecólogo y defensor del control de la natalidad, adoptó un tono mucho más dramático en su traducción francesa. Titulado _La faim du monde_ («El hambre del mundo»), llevaba como subtítulo: «La población aumenta. La tierra se agota. ¿Comeremos mañana?».

UN GESTOR Y UN NATURALISTA

Cuando la Sociedad Zoológica sufrió los estragos de la crisis económica y vio mermados sus efectivos de manera notable, Osborn Jr. aprovechó las circunstancias para darle un aire nuevo. Modernizó las instalaciones del parque zoológico siguiendo el ejemplo de los zoológicos alemanes, en los que se buscaba reproducir el ambiente natural de los animales. La institución fue fundada en 1895 para la conservación de la fauna salvaje americana, sobre todo los bisontes. Para Osborn, no se trataba solo de proteger ciertas especies notables: las amenazas ambientales eran múltiples y complejas, y debía responderse a ellas con una estrategia global basada en un conocimiento científico profundo.

En 1947, la sociedad se dotó de una sección dedicada a la conservación del suelo, la fauna y la flora, que llevaba a cabo estudios científicos sobre múltiples problemas: las razones de la disminución de la fauna en Alaska, el impacto de los plaguicidas, las repercusiones en el ecosistema de la erradicación de pequeños mamíferos, etcétera.

A diferencia de Osborn, Vogt no era un gestor, sino un naturalista de campo. Se relacionaba con ornitólogos de Nueva York, como el biólogo evolucionista Ernst Mayr (1904-2005) o el autor de guías de campo Roger Tory Peterson (1908-1996). De 1935 a 1939, Vogt dirigió la revista de la Sociedad Audubon, *Bird-Lore*, a la que imprimió resueltamente una moderna visión ecológica, buscando la colaboración de autores como el naturalista experto en bosques Aldo Leopold (1886-1948), el zoólogo Paul Lester Errington (1902-1962) o el ecologista y escritor Paul Bigelow Sears (1891-1990). Desde hacía algunos años, los tres eran fervientes defensores de la protección de los ecosistemas en su conjunto: una especie solo puede ser preservada si se protege su ambiente, desde el lugar donde vive hasta sus depredadores. Surgido después de la Primera Guerra Mundial, al propio tiempo que la ecología, este enfoque integral del ambiente se basaba en los conceptos más recientes de esta nueva ciencia: ecosistema, comunidad biótica (los seres vivos de un ecosistema), relaciones tróficas (depredador-presa), etcétera. Aunque, por lo pronto, contaba con pocos adeptos. Tanto es así que algunos lectores de la revista de Vogt protestaron porque consideraban ese tipo de artículos demasiado serios y sesudos.

UN MUNDO DEVASTADO POR LA HUMANIDAD

Mientras trabajaba (1939-1942) para la empresa que gestionaba el guano de Perú, Vogt descubrió las complejas relaciones entre el medio natural y los seres humanos. De 1840 a 1880, el guano (un potente abono derivado de los excrementos de las aves marinas) fue objeto de un comercio intensivo y rentable. A principios del siglo xx, Perú estaba decidido a perpetuar la explotación de este recurso y llamó a algunos expertos extranjeros. Vogt, que había adquirido conocimientos de ecología animal por los trabajos del zoólogo británico Charles Sutherland Elton (1900-1991) y de ecología práctica por los de Aldo Leopold, aportó una nueva experiencia, más amplia: su principal logro consistió en definir la relación entre las fluctuaciones de las poblaciones de aves y las de sus recursos nutritivos (pescado) causadas por el fenómeno de El Niño, una corriente estacional paralela a la costa de Perú.

El éxito de la gestión prudente de ese recurso natural alimentó el pensamiento de Vogt. A su regreso a Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial, tomó a su cargo el servicio de «conservación» de la Unión Panamericana (hoy Organización de Estados Americanos) y luego el del movimiento nacional de planificación familiar.

A pesar de su distinto bagaje cultural, Vogt y Osborn compartían la misma visión; el hecho de que ambos frecuentaran los mismos círculos intelectuales y culturales de Nueva York podría explicar la semejanza de su compromiso y análisis. Ambos dedicaron cuantiosas páginas de sus libros a la degradación de las tierras de cultivo, que a veces conducía a la desertificación.

EN SÍNTESIS

A mediados del siglo xx, William Vogt y Henry F. Osborn publicaron sendos libros que alertaban del agotamiento de los recursos naturales.

Precursores de los actuales debates sobre sostenibilidad y decrecimiento, ambos textos mostraban una gran preocupación por el impacto ambiental de la actividad humana.

Al generar una intensa discusión, contribuyeron a la popularizaron de ideas ecologistas que hasta entonces se trataban solo en círculos expertos.

La cuestión no era del todo nueva, ya que en los años treinta, varios científicos habían publicado informes alarmantes sobre la situación en África, Madagascar, Estados Unidos, etcétera. Hay que decir que la Gran Sequía con tormentas de polvo que asoló el sur del país en los años treinta (*Dust Bowl*) golpeó la imaginación: fruto de la pésima gestión del suelo durante un largo período de sequía desde 1930 hasta 1936, la erosión eólica de casi 400.000 kilómetros cuadrados de tierra americana desató la hambruna y la miseria. Vogt y Osborn atribuyeron esta degradación a las mismas causas: superpoblación, falta de conocimiento, imprevisión, afán de lucro y dinero fácil.

Del mismo modo, ambos ofrecieron numerosos ejemplos de imprudencia humana, como la introducción del conejo en Australia y Nueva Zelanda a mediados del siglo XIX: una década después, estos lagomorfos se contaban por cientos de miles y habían dañado los cultivos y contribuido a la deforestación y la desertificación. Desde entonces, todos los medios empleados para su erradicación, como la introducción de depredadores, han fracasado o han originado desastres ecológicos.

Esos ejemplos constituyen una prueba del impacto humano en el equilibrio de la naturaleza: «El hombre se dedica a alterar este equilibrio en virtud de una necesidad inmediata, sin detenerse por un momento a pensar siquiera en sus consecuencias cercanas, e impulsado a veces por la ignorancia y la codicia», escribió Osborn. El concepto de equilibrio natural no refleja aquí la percepción de una naturaleza que se haya mantenido intacta desde su creación, puesto que los autores reconocen la evolución, sino la situación del medio natural antes de que fuera perturbado por la actividad humana.



A principios del siglo XX, para proteger el ciervo mulo (*arriba, pintado por Louis Agassiz Fuertes, ilustrador estadounidense de la época*) de la meseta de Kaibab, Arizona, se puso en marcha un programa de sacrificio sistemático de sus depredadores. Los ciervos experimentaron entonces un crecimiento demográfico sin precedentes que destruyó el entorno. Sin alimento, sus efectivos disminuyeron entonces drásticamente. Aldo Leopold se apoyó en este desastre ecológico para defender la protección integral del medio natural. William Vogt y Osborn Henry Jr. vieron en el caso del ciervo un escenario posible para la humanidad si no controlaba el crecimiento de la población.

La diferencia de cultura entre los dos autores resulta evidente: Osborn emplea la palabra ecología solo una vez, mientras que este término y sus derivados son objeto de numerosas entradas en el índice del libro de Vogt. Para este último, se trata de promover un enfoque nuevo: «Necesitamos una revolución, en el sentido que Kropotkin da a esa palabra: un cambio profundo en nuestras ideas fundamentales». Para llegar a ello, Vogt propugna la unión de las ciencias naturales y las humanidades, únicas disciplinas que proporcionarán las herramientas necesarias para educar a las generaciones jóvenes en los mejores usos de la tierra.

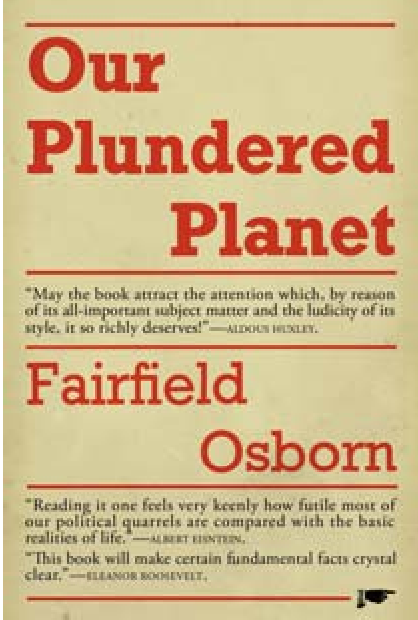
En última instancia, Vogt y Osborn afirman la importancia del conocimiento y de la investigación científica, todavía insuficientes a su parecer, aunque tampoco creen en el progreso científico y técnico sin fin o sin freno. A ambos les preocupa el uso del DDT. Comercializado en Estados Unidos desde hacía cuatro años cuando se publicaron los dos libros en 1948, este plaguicida fue presentado por sus fabricantes como un producto milagroso y seguro, la solución fácil y económica para terminar con los insectos. Precisamente porque destruye a todos los insectos de manera indiscriminada y porque se utiliza de forma masiva y sin coordinación, Vogt y Osborn temen su impacto ambiental por el colapso de las redes tróficas. En realidad, el uso generalizado del DDT no causará el efecto anunciado: los insectos dañinos enseguida adquieren resistencia al plaguicida, lo que obliga a intensificar la fumigación.

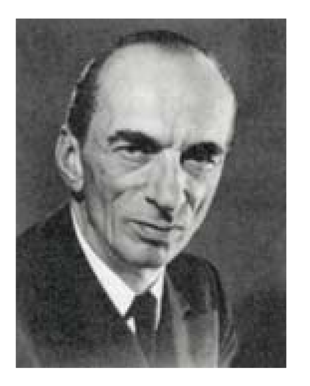
A FAVOR O EN CONTRA, EL PÚBLICO SE DESATA

La publicación de *Road to survival* y *Our plundered planet* provocó reacciones airadas. La geógrafa Eva Germaine Rimington Taylor recriminó a Vogt sus exageraciones, su incoherencia y su desprecio por los valores humanos. También señaló que, para él, los médicos eran enemigos públicos, ya que al eliminar las enfermedades, favorecían el aumento de la población que, como consecuencia de ello, padecería otros males. Para el historiador James Claude Malin, era solo una obra de propaganda a favor de la conservación, no un libro de ciencia o de historia. Varios críticos reprocharon el pesimismo de los dos libros: «Hacen temblar y están creando miedo, sin aportar muchas sugerencias sobre cómo podemos resolver este dilema que tan bien han expuesto», dijo un miembro de la administración, y agregó que era psicológicamente malvado no ofrecer ninguna esperanza. En realidad, ambos autores eran pesimistas sobre el futuro; sus ideas se relacionaron enseguida con las de Thomas Malthus (1766-1834). Vogt y Osborn compartían con el economista británico la convicción de que la población estaba limitada por los medios de subsistencia y que, por el contrario, solo el control de las actividades humanas y, especialmente, el control de la natalidad, compensarían el desequilibrio creciente entre las poblaciones que había que alimentar y los recursos disponibles.

Algunos analistas de la época les reprocharon que considerasen que la explotación sin fin de los recursos naturales no renovables conducía al desastre: ¿Estados Unidos y Europa no han sufrido ya el agotamiento de algunos recursos sin que su nivel de vida haya dejado de aumentar? En su libro, Vogt llegó

Henry Fairfield Osborn Jr., director de la Sociedad Zoológica de Nueva York (*fotografía*), dedicó su libro *Our plundered planet* («Nuestro planeta esquilmado») «a todos quienes se interesan por el mañana».





a la misma conclusión, pero explicó la situación de manera diferente: para aumentar su nivel de vida, Estados Unidos y Europa han actuado como «parásitos», agotando los recursos de sus colonias en beneficio propio sin preocuparse por el futuro. Mucho más radical que Osborn en su crítica del capitalismo, Vogt también hizo hincapié en varias ocasiones en los peligros del comercio libre: si se ejerce sin control, con el tiempo se destruyen los recursos naturales.

Uno de los analistas lamentó que Vogt y Osborn omitieran los avances recientes y prometedores en genética vegetal y no tuvieran en cuenta que los nuevos conocimientos, aplicados a escala planetaria, deberían mejorar la producción agrícola y técnica.

Las opiniones eran a veces diametralmente opuestas. Al final de una crítica feroz, el economista agrícola Karl Brandt consideraba que «el *best seller* del Sr. Vogt es la obra de un naturalista que ha irrumpido en las ciencias sociales y se ha vuelto loco de atar»; el arqueólogo e historiador Sir John Linton Myres encontraba la obra «bien informada, bien escrita y firme en sus argumentos y recomendaciones» y esperaba «que este libro sincero y franco pueda hacer algo para salvar a la humanidad». Muchos expertos señalaron los errores cometidos por los autores. En Francia, el demógrafo Alfred Sauvy dedica a las cuestiones demográficas planteadas por Vogt un largo artículo con un título explícito: *El «falso problema» de la población mundial*. En dicho artículo, Sauvy pone de relieve la compartimentación geográfica de las cuestiones demográficas y lo intricado de los problemas expuestos.

DEL PROGRESISMO AL DECRECIMIENTO

También varios ecólogos destacados se pronunciaron acerca de los dos libros. Especialista en ecología vegetal que estudió el fenómeno de la Gran Sequía, Sears instó a sus colegas geólogos para que intervinieran en el debate. De la misma opinión era Sir Frank Fraser Darling, para quien resultaba evidente que «la agricultura tiene que ser conducida con un enfoque más biológico de lo que se ha hecho hasta la fecha. El ecólogo debe descender de su cima olímpica y meter sus manos —y la cabeza— en el barro de una granja.» Elton destacó que la obra de Vogt resultaba muy innovadora, porque era la primera en abordar la cuestión del aumento de la población humana en términos ecológicos, y concluía con la esperanza de que el libro incitara a los expertos en ecología animal a interesarse por este tema.

Vogt y Osborn eran descendientes del progresismo americano, el movimiento reformista surgido en el siglo XIX. Iniciado en las clases medias urbanas, luchaba contra el despilfarro y la corrupción, y creía que siempre se podía encontrar la mejor manera de resolver un problema. Es en este contexto donde hay que situar su enfoque. No pretendían anunciar el fin del mundo, sino alertar sobre el deterioro de la calidad de vida de las personas que acarreaban la superpoblación y la destrucción de los recursos naturales.

Abordaron repetidas veces las dimensiones morales del progreso e ironizaron afirmando que un mundo de objetos no podía aportar por sí solo la felicidad: «Pocos son los americanos que no están convencidos de que el *summum bonum* depende de la cantidad de bienes materiales que se posean», decía Vogt. También le preocupaba el impacto en la salud mental que acarreaba la mejora del nivel de vida en Estados Unidos, donde existía «el nivel más alto de trastornos mentales en todo el mundo». Asimismo, denunció el derroche del que el automóvil ofrecía un ejemplo perfecto. Ello tenía consecuencias sobre las decisiones políticas: «Cuando surge la posibilidad de agotamiento de nuestras fuentes de petróleo, enviamos la armada al Mediterráneo...». Aquí, como en tantas otras ocasiones, los análisis de ambos autores sorprenden por su vigencia.

Aunque los libros de Vogt y Osborn no crearon un pensamiento ambiental original, consiguieron que mucha gente tomase conciencia de la complejidad y la globalización de los problemas a los que se enfrentaba el mundo tras la Segunda Guerra Mundial. La creación en 1945 de las Naciones Unidas, la UNESCO y la FAO muestra que este cambio de escala es percibido por todo el mundo, que «la Tierra es cada vez más pequeña» y que conviene «tomar en consideración a toda la humanidad como una sociedad única a escala mundial», resume Osborn. Merecen aún otro mérito: como escribió en 1949 el sociólogo Wilbert Ellis Moore, la cuestión de los recursos naturales fue tratada en principio por autores que «no estaban interesados en la gente, sino en las aves, las abejas y las flores, y en el espesor de la capa superior del suelo». Fue la magnitud de este debate, puesta de relieve por ambos libros, lo que incitó a otros especialistas (demógrafos, geólogos, sociólogos, bioquímicos, etcétera) a participar e implicarse a fondo en la discusión.

PARA SABER MÁS

Camino de supervivencia. William Vogt. Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1952.
Preserving the nation: The conservation and environmental movements, 1870-2000. R. Wellock. Harlan Davidson Inc., 2007.
First along the river: A brief history of the U. S. environmental movement. B. Kline. Rowman & Littlefield, 2007.
La planète au pillage. H. F. Osborn Jr. Actes Sud, 2008.
Primavera silenciosa. Rachel L. Carson. Editorial Crítica, Barcelona, 2010.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **CIENCIAS AMBIENTALES**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MEDICINA

EL SECRETO DE LOS CONTROLADORES DE ÉLITE

Un grupo singular de personas infectadas por el VIH no necesitan medicamentos para mantener el virus bajo control. Su buena fortuna podría señalar el camino hacia tratamientos más eficaces y, quizás, hacia una vacuna

Bruce D. Walker
Fotografías de Richard Renaldi

Casos singulares: las características genéticas particulares de estas cuatro personas les han permitido combatir y detener el VIH sin necesidad de recibir politerapia contra el virus. Scott Wafrock (*arriba a la izquierda*) ha vivido con el VIH durante 26 años. Bob Massie (*arriba a la derecha*), durante 34 años, y Loreen Willenberg (*abajo a la derecha*), durante 20 años. Doug Robinson (*abajo a la izquierda*) supo que estaba infectado en 2003.






Bruce D. Walker vio a su primer paciente con sida en 1981, cuando todavía era médico residente. Ahora es director del Instituto Ragon de Boston y profesor en la Escuela de Medicina de Harvard y en la Universidad de KwaZulu-Natal de Durban, Sudáfrica.



Un día de principios de 1995, un hombre llamado Bob Massie entró en mi consulta del Hospital General de Massachusetts de Boston. Me explicó que estaba infectado por el VIH (el virus que causa el sida) desde hacía 16 años pero nunca había presentado ningún síntoma. Tras realizarle una exploración física, confirmé que estaba sano, en clara contraposición con el resto de los pacientes que visité el mismo día. En esa época se estaba ensayando una nueva combinación de fármacos que, con el tiempo, frenaría el declive progresivo de la función inmunitaria ocasionado por el VIH. Sin embargo, en 1995, los infectados por el VIH desde hacía una década, o más, ya habían desarrollado el sida, la etapa marcada por la imposibilidad de luchar contra otros patógenos. El joven que se hallaba frente a mí nunca había tomado medicación contra el VIH y tenía la firme convicción de que si yo desvelaba el secreto de su buena fortuna, la información podría ayudar a otros a superar una enfermedad por entonces considerada mortal en todos los casos.

Massie nació con hemofilia, un trastorno de la coagulación sanguínea. En aquellos días, casi todos los hemofílicos estaban infectados por el VIH, ya que se habían sometido a repetidas perfusiones de hemoderivados aglomerados procedentes de miles de donantes, ninguno de los cuales se cribó para el VIH hasta mediados o finales de los años ochenta del siglo xx. (Hoy en día, los hemofílicos reciben factores de coagulación artificiales y así evitan el riesgo de contaminación por el VIH.) Algunas de las muestras sanguíneas de Massie que se habían guardado para un estudio revelaron que había contraído el VIH en 1978. Sin embargo, todas las pruebas que llevé a cabo con él o con sus muestras conservadas demostraron que presentaba una cantidad casi nula de virus en sangre y a la vez mantenía una respuesta inmunitaria fuerte a lo largo del tiempo.

Me quedé atónito. Por primera vez me encontraba cara a cara con un paciente que parecía mantener bajo control el VIH y lo había estado haciendo durante una década y media. Massie, como se vio después, no era el único caso. A principios de los noventa, algunos investigadores de California, Maryland, Italia y Francia habían conocido a individuos igualmente singulares y estaban estudiándolos con atención. En última instancia, se determinó que esas personas se dividían en dos grupos principales: un conjunto de «pacientes de progresión lenta», cuyo organismo luchaba contra una infección por el VIH durante largo tiempo, pero al final enfermaba, y un grupo mucho más reducido, pero aún más sorprendente, de «controladores de élite», como Massie, quienes simplemente no desarrollaban nunca el sida a pesar de no haber tomado nunca ningún medicamento contra el VIH.

De algún modo, los controladores de élite mantienen unos niveles del virus extremadamente bajos, o incluso indetectables, en su sangre. Si se averiguara el modo en que esos escasos individuos consiguen no enfermar, se podría crear una vacuna eficaz o desarrollar tratamientos que fortalecieran el sistema inmunitario de un paciente, en lugar de simplemente atacar al virus con fármacos. [*Para conocer más sobre la curación funcional del sida, véase* «Vacunas terapéuticas contra el VIH», por Felipe García Alcaide; Investigación y Ciencia, mayo de 2012.]

Tal logro satisfaría una necesidad apremiante. Actualmente, unos 33 millones de personas en todo el mundo viven con el VIH. De ellos, más de seis millones tienen acceso a medicamentos contra el virus, pero estos fármacos no curan la infección por el VIH y deben tomarse de por vida. Resulta poco probable que el tratamiento farmacológico se pueda proporcionar a todos los infectados durante el tiempo que lo precisan. Necesitamos con urgencia una solución para prevenir la infección en quienes aún no se han infectado y evitar que la enfermedad se desarrolle en quienes ya lo están.

Después de estudiar durante dos decenios a controladores de élite como Massie, mi equipo se halla más convencido que nunca de que sus características bioquímicas únicas ofrecen una información excepcional de utilidad en la prevención y tratamiento del sida. Este nuevo enfoque tiene una enorme implicación a la hora de hallar métodos que ayuden al sistema inmu-

EN SÍNTESIS

Una de cada 300 personas infectadas por el VIH son capaces de mantener bajo control el virus sin necesidad de tomar medicamentos antivíricos.

Se cree que la clave de la capacidad extraordinaria de los controladores de élite radica en el complejo funcionamiento de su sistema inmunitario.

Los estudios genéticos revelan por qué en esas personas se producen con mayor rapidez el ataque y la destrucción de las células infectadas por el VIH.

El conocimiento detallado de esa respuesta inmunitaria fuerte y eficiente podría dar lugar algún día a mejores métodos de prevención y tratamiento del sida.

nitario a combatir una gran variedad de enfermedades infecciosas humanas, y tal vez, algunos tipos de cáncer.

A partir de **1,3 millones** de medidas de ADN realizadas por paciente en un estudio que pretendía explicar el modo en que algunas personas lograban detener el VIH,

↓

se identificaron **300** variables genéticas diferentes en los controladores de élite.

↓

Las pruebas adicionales redujeron el centro de interés a **cuatro** fragmentos de ADN independientes.

↓

El análisis final descubrió variaciones en **una** proteína clave que favorece la respuesta inmunitaria contra el VIH.

POCOS GENERALES

Para entender la singularidad de los controladores de élite como Massie y la razón por la que esos casos ofrecen una esperanza para vencer el sida y otras enfermedades, describiremos primero cómo el VIH ataca el cuerpo y el modo en que este trata de defenderse. En los últimos 30 años, se ha demostrado que los sistemas inmunitarios de la mayoría de las personas infectadas por el VIH contraatacan con dureza la infección inicial produciendo una gran cantidad de anticuerpos contra el virus. Por desgracia, los anticuerpos no resultan eficaces y la infección persiste, incluso en los controladores. Los mecanismos que intentan combatir el virus a pesar de esa deficiencia son bastante tortuosos y, a veces, misteriosos. Pero en esencia, dos tipos de células inmunitarias, los linfocitos T coadyuvantes (o CD4+) y los linfocitos T asesinos (CD8+), así como ciertas moléculas, los receptores del complejo mayor de histocompatibilidad (HLA, por sus siglas en inglés), parecen desempeñar las funciones más importantes.

Como todos los virus, el VIH es incapaz de reproducirse por sí solo. Cuando infecta una célula, se adueña de su maquinaria y la obliga a fabricar nuevos virus en lugar de realizar sus funciones celulares habituales. Sin embargo, las células infectadas contienen un sistema de aviso inmediato que alerta al cuerpo de los invasores. En las primeras horas de una incursión vírica, las células infectadas transportan hasta su superficie los fragmentos de las proteínas víricas que se ven obligadas a sintetizar. Allí, los receptores del HLA exhiben los fragmentos del material ajeno. La presencia de proteínas víricas unidas a las moléculas del HLA en estas células atrae pronto la atención del sistema inmunitario. Este programa los linfocitos T coadyuvantes para que movilicen un grupo de linfocitos T asesinos que, a continuación, se preparan de modo específico para destruir las células infectadas por el VIH. En otro intento simultáneo aunque inútil de eliminar a los invasores, los linfocitos T coadyuvantes desencadenan en otras células inmunitarias la producción gradual de anticuerpos que se adhieren a componentes específicos de los virus liberados por las células infectadas.

Ese esfuerzo defensivo resulta eficaz en la mayoría de las infecciones víricas. Sin embargo, el VIH se vale de un truco inusual que termina por anular al sistema inmunitario: el virus se dirige con preferencia a los linfocitos T coadyuvantes, incluidos los que se hallan preparados para defender al organismo contra él. Este acto particular de sabotaje conduce directa o indirectamente a la destrucción final de la mayoría de los linfocitos T coadyuvantes disponibles. Si uno piensa en los linfocitos T coadyuvantes como los generales del sistema inmunitario y en los linfocitos T asesinos como los soldados de infantería, el VIH dispara con suma puntería a los generales, que dejan así de dar órdenes a los soldados sobre cómo proceder. En el sentido más simple, el VIH es una infección del sistema inmunitario; los resultados son previsibles: una incapacidad definitiva para defenderse, no solo contra el VIH, sino también contra centenares de otros invasores.

Cuando Bob Massie se presentó en la consulta a mediados de la década de los noventa, nuestro laboratorio estaba concentrado en estudiar el papel de los linfocitos T asesinos en la lucha contra el VIH. Supusimos que si el sistema inmunitario de Massie mantenía bajo control el VIH, debería sin duda generar una respuesta inusualmente intensa de linfocitos T asesinos. Lo incorporamos en un estudio que estábamos realizando y pronto descubrimos que presentaba la mayor reacción que habíamos visto nunca de linfocitos T asesinos contra el VIH. En otras palabras, su sistema inmunitario producía un gran ejército de infantería expresamente entrenado para reconocer al VIH. El resultado encajaba con nuestra hipótesis, aunque otros hombres y mujeres infectados por el VIH también exhibían respuestas fuertes de linfocitos T asesinos y, sin embargo, desarrollaban el sida; en ellos la infantería era numerosa pero no luchaba con suficiente eficacia.

Esa observación condujo a su vez a una segunda hipótesis. Tal vez los linfocitos T asesinos de Massie combatían con vigor porque habían recibido las instrucciones adecuadas de linfocitos T coadyuvantes especialmente eficaces. En otras palabras, tanto los generales (linfocitos T coadyuvantes) como los soldados de infantería (linfocitos T asesinos) poseerían una preparación excelente.

Se daba la circunstancia de que en el primer proyecto de mi carrera investigadora, emprendida a mediados de la década de los ochenta, había examinado las distintas etapas en las que los linfocitos T coadyuvantes coordinaban la respuesta inmunitaria frente al VIH. Mi grupo había estudiado muestras de sangre de docenas de pacientes de sida para buscar pruebas de que los linfocitos T coadyuvantes organizaban el contraataque. Sin embargo, durante meses no hallamos ningún indicio de ello. Parecía como si el sistema inmunitario se viera incapacitado para generar una respuesta de alto nivel. De hecho, la ausencia de linfocitos T coadyuvantes específicos para el VIH constituía la brecha más evidente en el repertorio defensivo de los individuos infectados.

Sin embargo, Massie no sufría sida y mantenía bajo control la infección por el VIH. Por tanto, decidimos realizar en él el

mismo ensayo que habíamos empleado hacía diez años. Esta vez, los primeros datos revelaron lo que habíamos predicho que sucedería si el sistema inmunitario estuviese combatiendo con eficacia la infección: Massie no solo contaba con linfocitos T coadyuvantes entrenados para dirigir una campaña contra el VIH, sino que estos se presentaban en gran número. Publicamos nuestros resultados en *Science* en 1997. Nuestro artículo demostró que, en ocasiones, los linfocitos T coadyuvantes de los individuos infectados por el VIH reaccionaban con vigor contra el virus, un descubrimiento que cambió de forma fundamental el modo en que nuestro grupo entendía el VIH. Por fin se vio la posibilidad de que, en ciertos casos, el sistema inmunitario pudiera tomar ventaja frente a un virus que estaba matando a millones de personas en todo el planeta.

MÁS PREGUNTAS

Al igual que con otros descubrimientos científicos, el hallazgo de que una respuesta eficaz de los linfocitos T asesinos frente al VIH exigía una estructura robusta de linfocitos T coadyuvantes generó numerosas preguntas e hipótesis nuevas. ¿Había eliminado realmente Massie el virus de su cuerpo? Comprobamos que no, puesto que detectamos material genético del virus en su sangre. [*Para entender por qué algunas personas, a diferencia de Massie, resultan inmunes al VIH, véase* «Cerrar el paso al VIH», por Carl June y Bruce Levine; Investigación y Ciencia, mayo de 2012]. ¿Podría Massie contagiar todavía a otros? No lo sabíamos, pero suponíamos que sí (una cuestión importante para él y su esposa, así como para la hija que tuvieron más tarde). ¿Se hallaba su sistema inmunitario, de alguna manera, potenciado y podía luchar contra todos los invasores? La respuesta aquí, por desgracia, fue no, porque también se había infectado por el virus de la hepatitis C (otra consecuencia de la contaminación del tratamiento contra la hemofilia) y su cuerpo era incapaz de hacer frente a tal virus. (Massie recibió más tarde un trasplante de hígado que le curó no solo la hepatitis, sino también la hemofilia, puesto que el hígado nuevo podía sintetizar los factores de coagulación necesarios.)

Consideramos, por tanto, la posibilidad de que todas las personas infectadas producían linfocitos T coadyuvantes específicos para el VIH, pero que estos eran atacados y destruidos en las etapas tempranas de la invasión. Si ello fuera cierto, la administración precoz de un conjunto de fármacos que inhibieran con fuerza la producción del virus conferiría protección a los linfocitos T coadyuvantes de las personas recién expuestas. Este primer golpe permitiría al sistema inmunitario tomar ventaja sobre el virus y mantener el control con tanta eficacia como lo hacía el cuerpo de Massie de forma natural. Realizamos ensayos clínicos con algunas docenas de voluntarios y demostramos que el tratamiento temprano daba lugar, en poco tiempo, al descenso de la cantidad de VIH en sangre hasta unos niveles indetectables y, tras algunas semanas, a la producción masiva de linfocitos T coadyuvantes, capaces de organizar el combate de los linfocitos T asesinos contra el VIH.

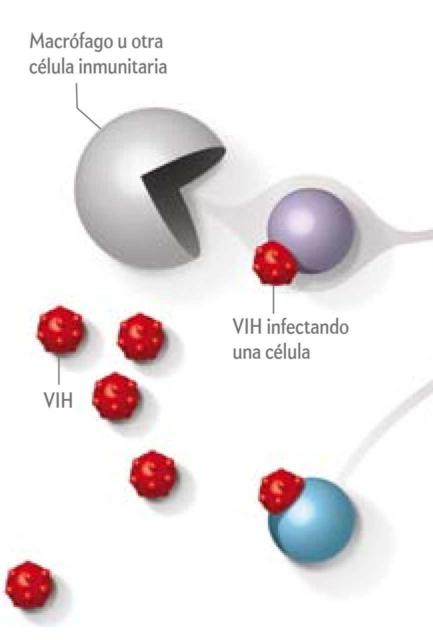
Por desgracia, la protección recién descubierta no ofrecía el tipo de control inmunitario duradero que presentaba Massie. Como parte de un ensayo clínico de seguimiento, interrumpimos el tratamiento en unos cuantos sujetos (con su consentimiento informado y tras recibir la autorización de un comité de revisión ética). Después de un año o más sin tratamiento, la mayoría de los pacientes experimentaron un incremento gradual en el nivel del virus en sangre, de modo que tuvo que reiniciarse la administración de fármacos contra el VIH. Sin embargo,

ASÍ SE DEFIENDEN LOS CONTROLADORES

Cubrir una brecha en las defensas

A diferencia de la mayoría de las personas infectadas por el VIH (*cuadro superior*), unos pocos individuos (*cuadro inferior*) logran mantener una cantidad baja o indetectable del virus en el organismo, porque su sistema inmunitario se halla muy bien preparado para reconocer y destruir las células infectadas.

1 Al principio, las células ambulantes del sistema inmunitario (como los macrófagos) atacan a las células que, tras ser infectadas por el VIH, fabrican proteínas víricas.

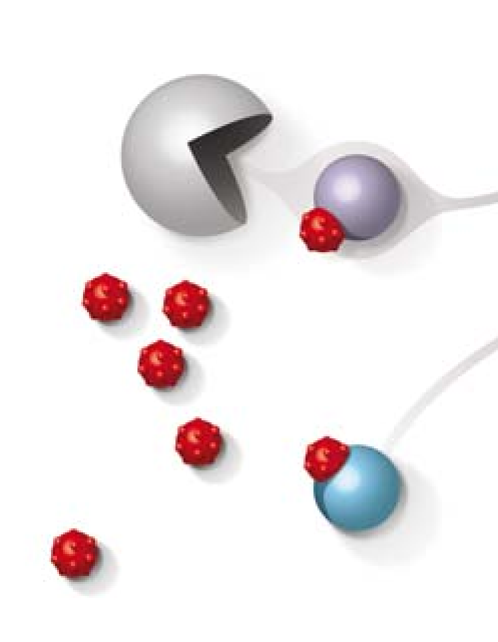


Respuesta habitual al VIH

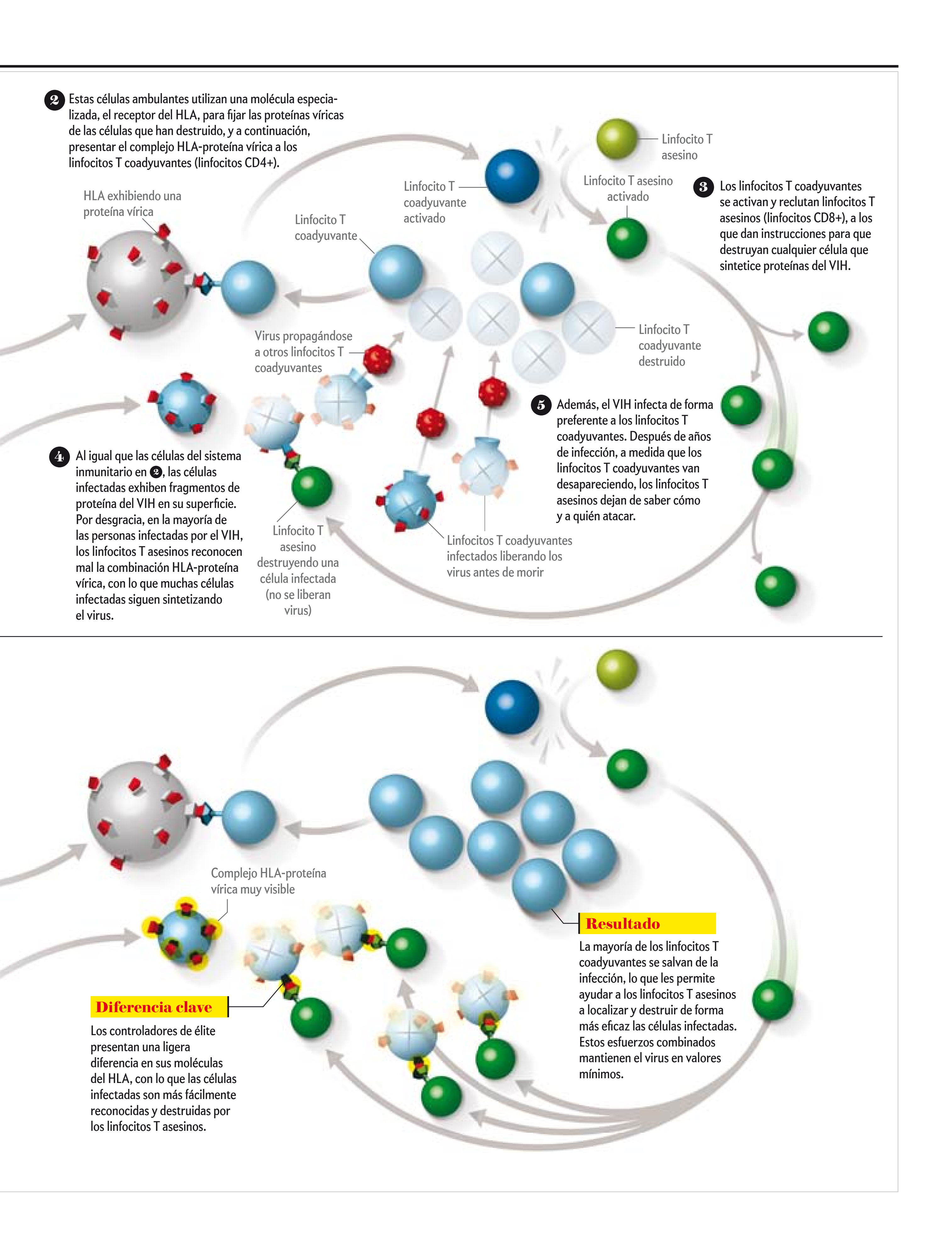
La infección por el VIH suele desatar una larga batalla entre el sistema inmunitario y el virus; el primero gana los combates iniciales, pero a medida que pasan los años va perdiendo más y más veces.

Respuesta superlativa

El sistema inmunitario de los controladores de élite empieza con la misma reacción básica, solo que de modo más eficiente. Esta respuesta excepcional evita el daño al resto del sistema inmunitario.



JEN CHRISTIANSEN



2 Estas células ambulantes utilizan una molécula especializada, el receptor del HLA, para fijar las proteínas víricas de las células que han destruido, y a continuación, presentar el complejo HLA-proteína vírica a los linfocitos T coadyuvantes (linfocitos CD4+).
HLA exhibiendo una proteína vírica
Linfocito T coadyuvante
Linfocito T coadyuvante activado
Linfocito T asesino
Linfocito T asesino activado
3 Los linfocitos T coadyuvantes se activan y reclutan linfocitos T asesinos (linfocitos CD8+), a los que dan instrucciones para que destruyan cualquier célula que sintetice proteínas del VIH.
Virus propagándose a otros linfocitos T coadyuvantes
Linfocito T coadyuvante destruido
5 Además, el VIH infecta de forma preferente a los linfocitos T coadyuvantes. Después de años de infección, a medida que los linfocitos T coadyuvantes van desapareciendo, los linfocitos T asesinos dejan de saber cómo y a quién atacar.
4 Al igual que las células del sistema inmunitario en 2, las células infectadas exhiben fragmentos de proteína del VIH en su superficie. Por desgracia, en la mayoría de las personas infectadas por el VIH, los linfocitos T asesinos reconocen mal la combinación HLA-proteína vírica, con lo que muchas células infectadas siguen sintetizando el virus.
Linfocito T asesino destruyendo una célula infectada (no se liberan virus)
Linfocitos T coadyuvantes infectados liberando los virus antes de morir
Complejo HLA-proteína vírica muy visible
Resultado
La mayoría de los linfocitos T coadyuvantes se salvan de la infección, lo que les permite ayudar a los linfocitos T asesinos a localizar y destruir de forma más eficaz las células infectadas. Estos esfuerzos combinados mantienen el virus en valores mínimos.
Diferencia clave
Los controladores de élite presentan una ligera diferencia en sus moléculas del HLA, con lo que las células infectadas son más fácilmente reconocidas y destruidas por los linfocitos T asesinos.

los resultados, que se publicaron en *Nature* en 2000, demostraron la posibilidad de mejorar, al menos temporalmente, el control del cuerpo sobre el VIH. Además, se podía hacer funcionar en otras personas los mismos mecanismos que permitían a Massie mantener a raya la infección.

¿Cómo podíamos hacer más duradero el control inmunitario, esto es, más parecido al de los controladores de élite? Hasta ese momento habíamos examinado la respuesta inmunitaria de los linfocitos T coadyuvantes y asesinos, que ya sabíamos cómo medir. Necesitábamos ahondar en el funcionamiento del sistema inmunitario para averiguar, de una vez por todas, las características peculiares de los controladores de élite que les protegían frente a los embates del VIH.

UN NUEVO ENFOQUE

Una serie de encuentros afortunados permitieron adentrarnos en los mecanismos que mantenían a raya el VIH. En aquel tiempo fui invitado a una cena organizada por Lawrence Summers, entonces presidente de la Universidad Harvard, para debatir sobre el papel creciente de la Escuela de Medicina en la salud mundial. También asistió a la cena Eric Lander, antiguo condiscípulo de Massie en la Universidad de Princeton y experto en la aplicación de los avances más recientes de la genética humana a la investigación médica. Hacía tiempo que deseaba conocer a Lander, líder del entonces recién creado Instituto Broad, una iniciativa conjunta de los institutos de tecnología de Harvard y Massachusetts, porque tal vez sus nuevas técnicas ayudarían a comprender mejor el VIH.

Aquella noche, Lander me explicó la posibilidad de comparar el ADN de diferentes personas a partir de las variaciones naturales en las letras A, T, C y G del código genético, conocidas como polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, por sus siglas en inglés), para identificar la influencia genética en la respuesta de un individuo a una enfermedad. Los SNP funcionarían como indicadores o marcadores para secciones del genoma de los controladores de élite como Massie. Si halláramos una configuración exclusiva de SNP que se asociara a la capacidad de detener al VIH, ello podría ayudarnos a localizar los genes responsables, si existiesen, de tal capacidad. Para realizar los estudios, necesitaríamos obtener un hisopo con saliva o una muestra de sangre de los controladores de élite y de los pacientes infectados por el VIH que hubieran desarrollado la enfermedad, y, a continuación, extraer de allí el ADN. Para obtener una muestra estadística adecuada, deberíamos ordenar, como mínimo, cerca de un millón de SNP por persona de unos mil controladores de élite y del doble de pacientes con sida.

La obtención de ADN de un gran número de personas con sida no planteaba problemas, pero parecía imposible encontrar tal cantidad de controladores de élite. En ese momento, nuestro grupo y otros conocíamos apenas un puñado de esas personas tan singulares, pero la idea de localizar a mil de ellas resultaba desalentadora.

En esa misma época, fui invitado a dar una conferencia en la ciudad de Nueva York a un grupo de 300 profesionales de la salud con una larga experiencia en el VIH. Durante mi charla, en la que presentaba el conocimiento actual sobre el modo en que el VIH ocasionaba el sida, se me ocurrió mencionar el caso de Massie. Por entonces, la prueba del VIH era mucho más sensible: detectaba hasta un mínimo de 50 copias del virus por mililitro de sangre. Massie siempre se hallaba por debajo de esa cifra. Por curiosidad, pregunté a mano alzada si cualquiera de los médicos o enfermeras presentes conocía algún caso parecido.

Me quedé sin respiración cuando vi levantar la mano a más de la mitad de las personas de la sala. Allí tenía la solución al problema de hallar mil controladores de élite. Solo con la ayuda de los asistentes a la charla cabía la posibilidad de reunir a 200 de estos individuos excepcionales. Si pudiéramos contactar con los médicos y enfermeras de las consultas de todo el país y pedirles que nos remitiesen sus controladores del VIH, podríamos alcanzar fácilmente el número necesario para realizar una búsqueda estadísticamente significativa. Se podría determinar así si existían variantes genéticas específicas que impulsaban o alteraban la capacidad del sistema inmunitario para combatir el VIH hasta neutralizarlo.

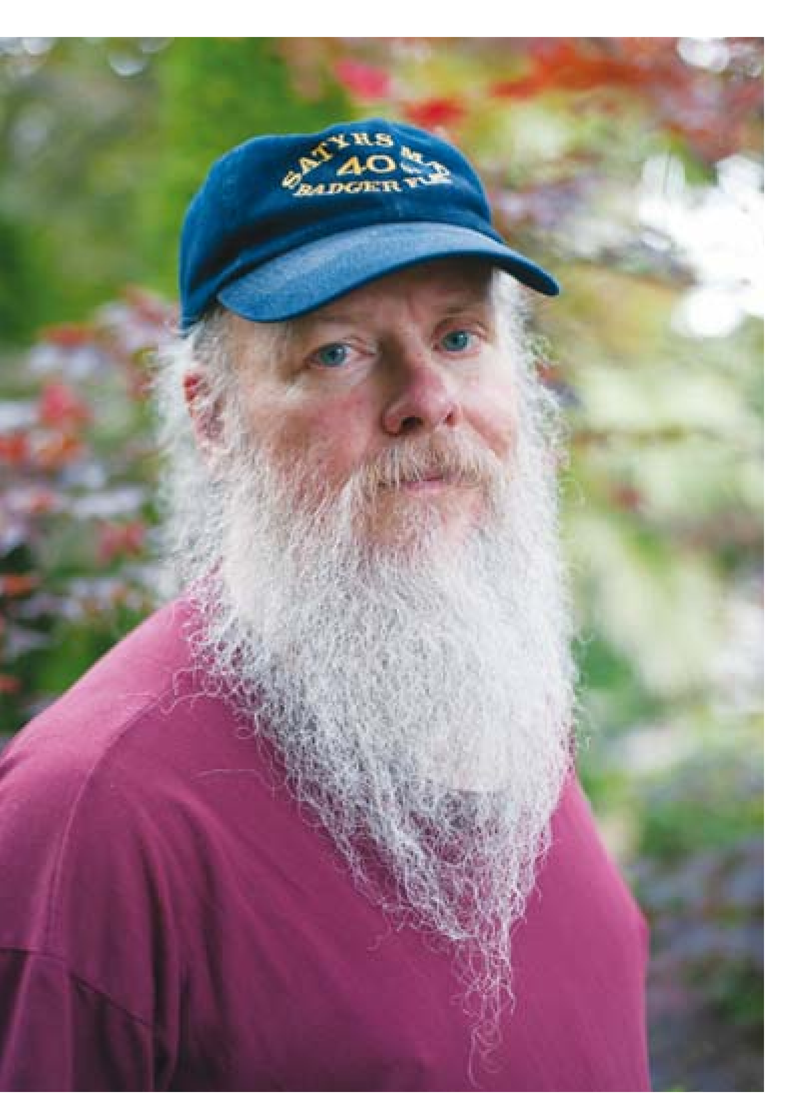
El Hospital General de Massachusetts nos dio la aprobación institucional para proceder con dicho estudio. Sin embargo, pronto nos topamos con otro obstáculo. La solicitudes de financiación presentadas a numerosos organismos no llegaban a ninguna parte. Consideraban nuestros objetivos algo vagos porque desconocíamos lo que estábamos buscando y las probabilidades de éxito parecían minúsculas.

Cuando estábamos luchando con este contratiempo, Mark Schwartz, presidente de Goldman Sachs en Asia, me invitó a desayunar con él en un hotel de la ciudad de Nueva York. Él y su esposa, Lisa, habían comenzado a financiar parte de los esfuerzos del Hospital General de Massachusetts y de la Universidad Harvard para formar a científicos y médicos en África que ayudaran a hacer frente a la crisis del sida. Durante nuestra reunión, le informé sobre el proyecto de los controladores de élite y se percató de la importancia que yo atribuía a los resultados de ese trabajo para orientar nuestro camino. Schwartz se interesó de inmediato por la lógica del estudio y se comprometió a financiarlo con 2,5 millones de dólares durante los próximos cinco años. Los fondos se gastarían en reclutar pacientes de todo el país y daríamos a conocer el éxito de las inscripciones para animar a otros financiadores a sufragar los análisis genéticos.

Empezamos enseguida el estudio. Nos pusimos en contacto con los principales médicos y enfermeras del VIH de EE.UU. Finalmente, recogimos muestras de ADN de pacientes de Europa, Asia, Australia y América del Sur. Intentamos también incluir controladores de élite de África, pero hallamos dificultades en encontrarlos porque, en ese momento, pocos países del continente realizaban el análisis sanguíneo sistemático para detectar el virus. Florencia Pereyra, de la Escuela de Medicina de Harvard, organizó el colosal esfuerzo de reclutamiento con la ayuda de tres asistentes. La Fundación Bill y Melinda Gates nos proporcionó una subvención de 20 millones de dólares durante cinco años para completar los estudios.

Llevó tanto tiempo procesar y analizar los datos como recoger las muestras. En cada uno de los 974 controladores de élite y de los 2648 enfermos de sida de nuestro estudio, identificamos unos 1,3 millones de SNP de su ADN con un sistema automatizado de chips. Utilizamos los potentes servicios informáticos del Instituto Broad para realizar las comparaciones entre los dos grupos de SNP. Paul DeBakker, genetista del instituto, dirigió el análisis computacional.

Hacia 2009 obtuvimos los primeros resultados. De los tres mil millones de nucleótidos del genoma humano, 300 SNP eran diferentes en los controladores de élite en comparación con las personas que tendían a desarrollar sida. Un análisis más detallado redujo esos 300 SNP a tan solo cuatro, cada uno de los cuales presentaba una elevada correlación con el control de la infección. Los cuatro se ubican en el cromosoma 6, que se sabe contiene numerosos genes que afectan a la funciones inmuni-



Superviviente: **Infectado durante tal vez 35 años, Steven Muench sigue sin necesitar medicamentos antivíricos, aunque el nivel del virus en su sangre se ha incrementado levemente en la última década.**

tarias. Pero seguíamos ignorando qué gen o genes resultaban relevantes y por qué.

Por lo menos, ahora sabíamos dónde buscar. El siguiente paso consistía en determinar la secuencia genética completa de la región del cromosoma 6 que el análisis de los SNP había identificado como importante. Aunque carecíamos de financiación para llevar a cabo esa nueva secuenciación, Xiaoming «Sherman» Jia, estudiante de medicina, resolvió el problema. Basándose en enormes conjuntos de datos de otros grandes estudios genéticos, desarrolló un algoritmo informático que, a partir de la combinación de SNP de cada persona, infería la secuencia de nucleótidos del ADN, o letras codificantes, de ese tramo del cromosoma y, a su vez, la secuencia de aminoácidos de la proteína codificada por esa región.

Como si dispusiéramos de un microscopio de mayor aumento, el análisis de Sherman ofreció de repente una imagen nítida. La principal diferencia genética entre los controladores de élite y los que desarrollaban sida se debía a un cambio de aminoácidos que afectaba a la forma de un surco de los receptores del HLA situados en la superficie de las células infectadas. El surco sostenía los fragmentos de las proteínas del VIH exhibidos por el receptor del HLA. La forma de esa hendidura hacía que la combinación HLA-VIH en las células infectadas de los controladores de élite resultara muy visible para los linfocitos T asesinos que, a continuación, procedían a destruirlas. El mecanismo podría compararse con un trabajador de una fábrica que desea notificar a la comunidad exterior que la planta ha sido tomada por terroristas que producen bombas; a tal fin, pinta de color naranja brillante sus manos y un pedazo de la bomba y agita el conjunto fuera de la ventana para que los transeúntes lo vean. Su acción ayuda a las autoridades a percatarse de que algo va mal, de modo que entran y se hacen cargo de la amenaza.

Habíamos hallado una pieza más del rompecabezas y el motivo por el que Massie y el resto de controladores de élite seguían sanos después de varios años. Desde los primeros días de la infección, su sistema inmunitario mantiene inalterados un número crítico de linfocitos T coadyuvantes específicos para el VIH, que proporcionan instrucciones vitales a los linfocitos T asesinos recién activados. Estos, a su vez, localizan y destruyen con rapidez las células infectadas por el VIH, porque las moléculas del HLA de la superficie de estas células están mejor dotadas para anunciar la presencia del intruso que en la inmensa mayoría de las personas.

Al mantener un número reducido de virus, los eficientes linfocitos T asesinos protegen de la infección a los linfocitos T coadyuvantes restantes. Los soldados de infantería defienden a los generales, lo que permite al sistema inmunitario combatir el virus hasta neutralizarlo. Nuestro enfoque genético, que empezó con hipótesis confusas y dependió de la colaboración de más de 300 investigadores de todo el mundo, reveló que la principal base genética para un control duradero de la infección por el VIH se reducía a las características de una sola proteína, la molécula del HLA.

Los descubrimientos, que se publicaron en *Science* en 2010, han planteado, una vez más, nuevas cuestiones. Necesitamos averiguar la manera de reproducir la respuesta inmunitaria de los controladores de élite en la mayoría de la gente infectada. Además, estamos empezando a entender el modo de ajustar las defensas del organismo para hacer frente a ciertas enfermedades, como la necesidad de favorecer una acción adecuada de los linfocitos T coadyuvantes y asesinos. [*Para conocer más acerca del tratamiento con linfocitos T en el cáncer, véase* «Vacunas contra el cáncer», por Eric von Hofe; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

El sistema inmunitario ha sido durante largo tiempo un colaborador poderoso de nuestro organismo, si bien imperfecto, en la lucha contra la enfermedad. Todavía nos queda un largo camino por recorrer, pero esperamos que pronto podamos ayudarlo a alisar las imperfecciones.

PARA SABER MÁS

The major genetic determinants of HIV-1 control affect HLA class I peptide presentation. International HIV Controllers Study en *Science*, vol. 330, págs. 1551-1557, 10 de diciembre de 2010. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3235490**

Immunogenetics of spontaneous control of HIV. Mary Carrington y Bruce D. Walker en *Annual Review of Medicine*, vol. 63, págs. 131-145, febrero de 2012. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22248321**

A song in the night: A memoir of resilience. Bob Massie. Nan A. Talese, 2012.



Rompehielos. A bordo del *Nathaniel B. Palmer*, un equipo de científicos atraviesa el mar de Weddell, cerca de las costas de la península antártica.



CAMBIO CLIMÁTICO

LA FUSIÓN DE LA ANTÁRTIDA EN DIRECTO

Mientras los glaciares se van hundiendo en el océano, se intenta calcular la velocidad de fusión del continente austral y su efecto en el ascenso del nivel del mar

Douglas Fox
Fotografías de Maria Stenzel

Douglas Fox es escritor científico. Ha colaborado con *Popular Mechanics, Esquire* y otras publicaciones.



EN 1995, DIEZ SOLDADOS ARGENTINOS ASISTIERON A UN CATACLISMO QUE NADIE ANTES HABÍA PRESENCIADO, UN EVENTO QUE MODIFICÓ NUESTRO CONOCIMIENTO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO.

Los hombres se alojaban en la base Matienzo, una lóbrega agrupación de barracas de acero en lo alto de una cresta volcánica que emerge sobre el mar a 50 kilómetros de la costa antártica. La isla se hallaba rodeada por una extensión de hielo glacial que abarcaba 1500 kilómetros cuadrados, unas 25 veces el área de Manhattan. A pesar de flotar sobre el mar, la plataforma de hielo medía 200 metros de espesor y poseía la solidez de una roca. Sin embargo, el capitán Juan Pedro Brückner presentía que algo iba mal. El agua derretida había formado pequeños lagos diseminados por el hielo. Podía escuchar el gorgoteo del líquido al infiltrarse por un sistema de grietas. El equipo de Brückner escuchaba día y noche convulsiones profundas, como si el metro pasara por debajo de sus camas. Los estruendos se oían cada vez con mayor frecuencia.

Un día, mientras los miembros del equipo comían en una de las barracas, fueron sacudidos por un estallido, «un estruendo ensordecedor, como una erupción volcánica», recuerda Brückner. Salieron corriendo al exterior. La plataforma de hielo que circundaba el islote se estaba rompiendo. Las sacudidas eran tan violentas que temían que los fragmentos de hielo llegaran a socavar la base rocosa de la isla y la hiciera rodar como un tronco a la deriva. Colocaron bajo sus pies instrumentos para detectar una posible inclinación del suelo. Al cabo de unos días de tensión, el equipo fue evacuado en helicóptero a otra estación ubicada 200 kilómetros más al norte. La isla permaneció en su sitio, pero el mapa quedó modificado para siempre.

Brückner y su equipo habían presenciado el colapso de la plataforma de hielo Larsen A, lo que se convertiría en un acontecimiento de referencia. Conforme los veranos cálidos se han ido extendiendo desde el extremo meridional de Sudamérica hasta alcanzar la región más septentrional de la península antártica, un total de cuatro plataformas de hielo ubicadas al este de la península, entre ellas Larsen A, se han ido derrumbando siguiendo una asombrosa pauta, desde el extremo norte hacia el sur en dirección a la Antártida continental.

Cuando una plataforma desaparece, los glaciares que descuellan a sus espaldas, retenidos en los fiordos a lo largo de la costa, se deslizan sin obstáculos hasta el océano. Y al hacerlo, aumentan de modo notable el volumen del mar. Se desconocen todavía las causas que originan la ruptura de una plataforma de hielo o el momento en que tendrá lugar el siguiente colapso. Por tanto, los esfuerzos se concentran en estimar la velocidad a la que los glaciares volcarán su hielo en el océano y en calcular el consiguiente ascenso del nivel del mar. A pesar de que un informe histórico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) elaborado en 2007 predijo que en 2100 el nivel del mar habrá ascendido tan solo entre 18 y 59 centímetros, los glaciólogos temen que la aceleración del cambio climático podría aumentar diez veces la velocidad de fusión de los glaciares, por lo que el nivel del mar se elevaría más de lo augurado. El colapso de las plataformas de hielo podría hallarse detrás de ese efecto, [*véase* «Dinámica de los casquetes glaciales», por Robin E. Bell; Investigación y Ciencia, abril de 2008.]

La península antártica alberga solo una pequeña fracción del hielo continental, pero constituye «un laboratorio natural», en palabras de Theodore Scambos, glaciólogo del Centro Nacional de Datos sobre Hielo y Nieve en Boulder, Colorado. Representa un avance de lo que sucederá en el resto de la Antártida entre los próximos 50 y 100 años.

Entender este experimento natural se ha convertido en una prioridad. Se necesita conocer la velocidad a la que se desintegran las plataformas de hielo y las causas de su desaparición para poder estimar con mayor precisión los futuros ascensos del nivel del mar. Como en tantas otras ocasiones, los modelos calculan por lo bajo y subestiman la magnitud del cambio, afirma Robert DeConto, diseñador de modelos numéricos de plataformas de hielo en la Universidad de Massachusetts en Amherst. «No podremos continuar investigando hasta que no recibamos nuevos datos.» Los expertos que han realizado campañas recientes al continente helado han instalado instrumentos que suministran información de utilidad. Las últimas predicciones basadas en dichos datos son alarmantes.

EL DERRUMBE DEL ICEBERG UK211

La primera desaparición documentada de una plataforma de hielo antártica se produjo hace unos 25 años. Una imagen de satéli-

EN SÍNTESIS

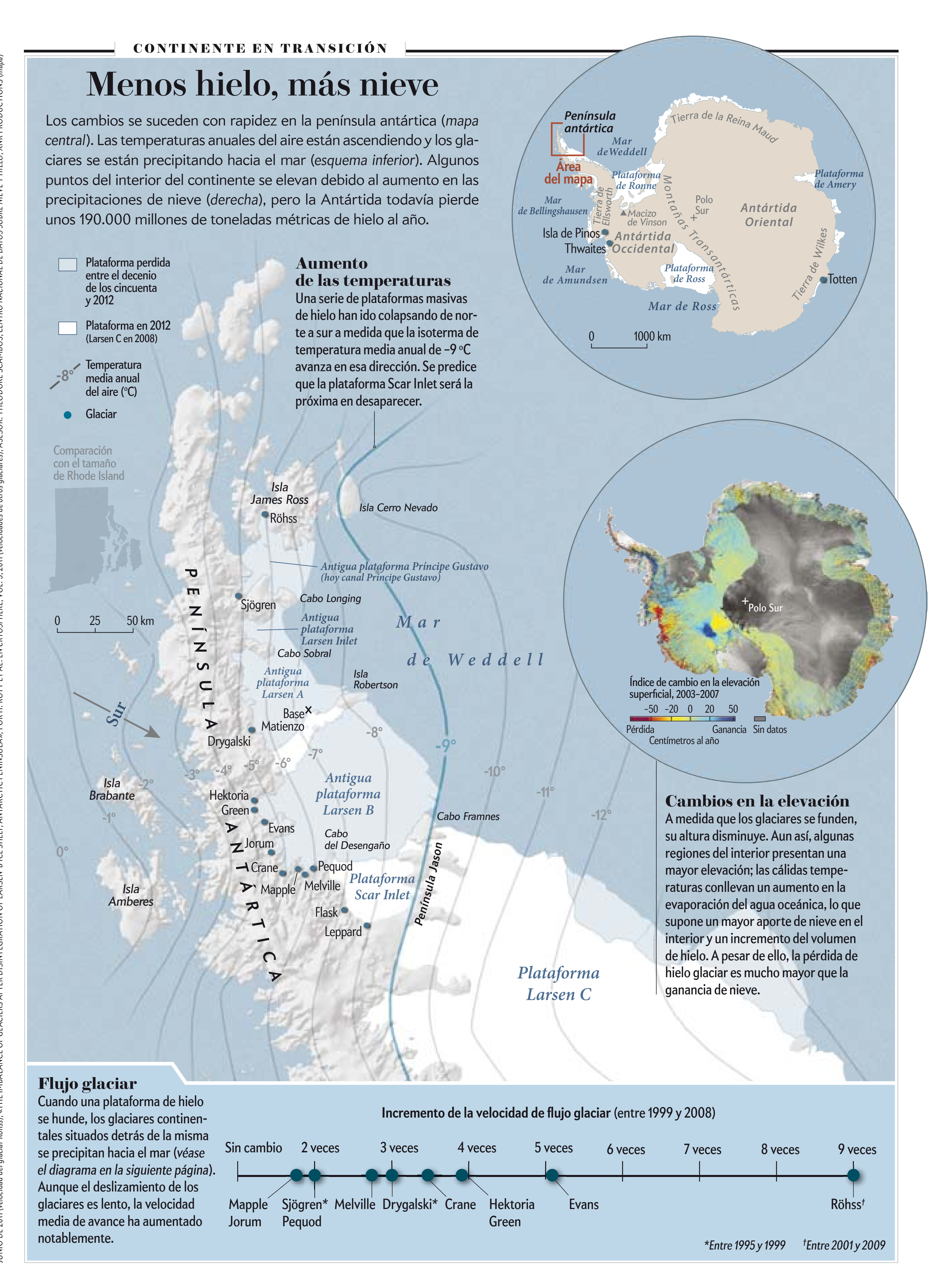
Las enormes plataformas de hielo unidas a las costas antárticas se están derrumbando. Ello hace que los glaciares situados a sus espaldas se deslicen hasta el océano y, en consecuencia, ascienda el nivel del mar.

Para estimar la futura elevación del nivel del mar resulta necesario esclarecer las razones por las que las plataformas se desintegran y la velocidad a la que lo hacen.

Los datos glaciológicos obtenidos por satélite no poseen el grado de detalle necesario para elaborar cálculos exactos. En fecha reciente se han realizado expediciones a la Antártida para instalar instrumentos que facilitarán la obtención de información. Douglas Fox les acompañó en un intenso viaje de ocho semanas que relata en el presente artículo.

Menos hielo, más nieve

Los cambios se suceden con rapidez en la península antártica (*mapa central*). Las temperaturas anuales del aire están ascendiendo y los glaciares se están precipitando hacia el mar (*esquema inferior*). Algunos puntos del interior del continente se elevan debido al aumento en las precipitaciones de nieve (*derecha*), pero la Antártida todavía pierde unos 190.000 millones de toneladas métricas de hielo al año.



Aumento de las temperaturas

Una serie de plataformas masivas de hielo han ido colapsando de norte a sur a medida que la isoterma de temperatura media anual de –9 ºC avanza en esa dirección. Se predice que la plataforma Scar Inlet será la próxima en desaparecer.

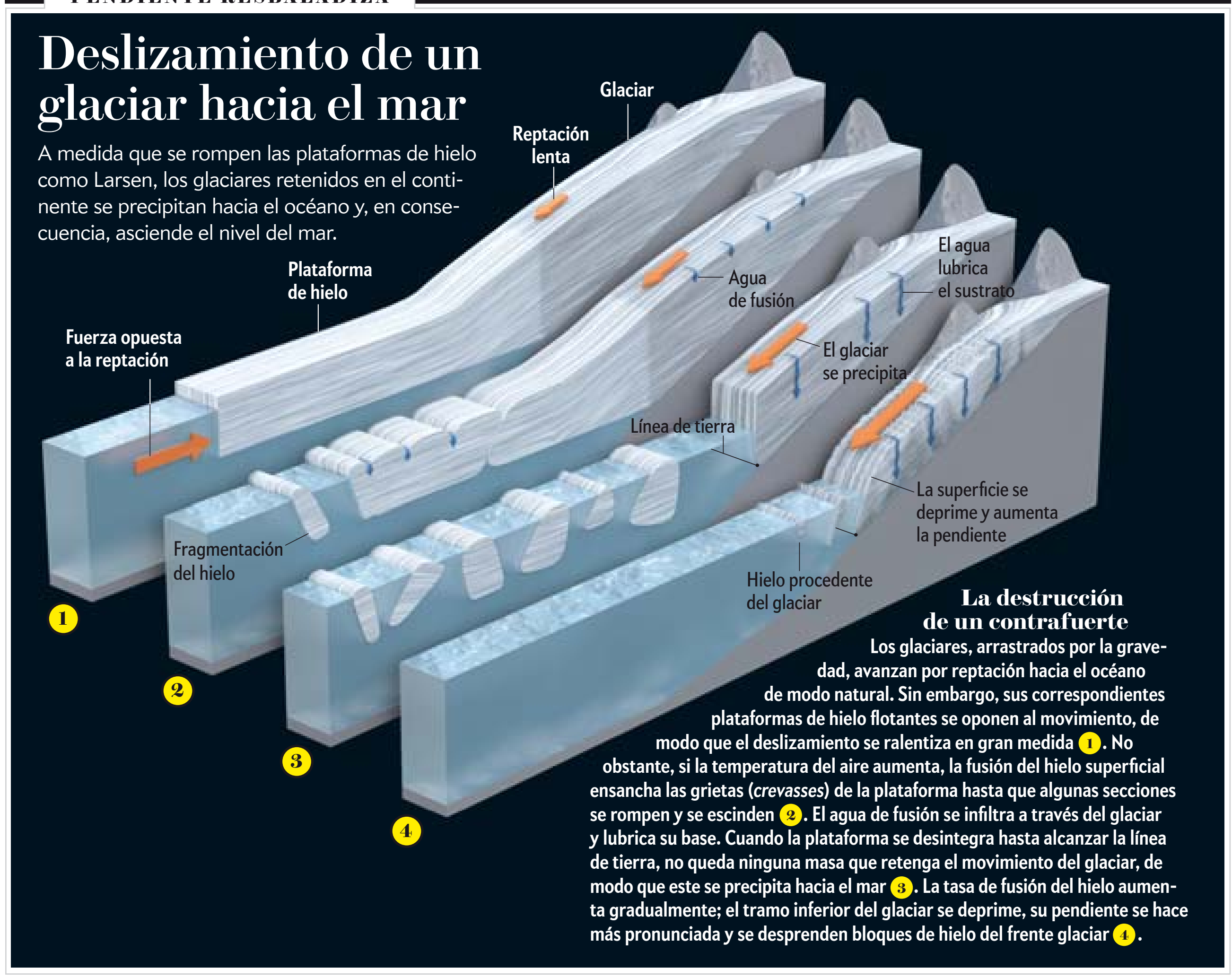
Cambios en la elevación

A medida que los glaciares se funden, su altura disminuye. Aun así, algunas regiones del interior presentan una mayor elevación; las cálidas temperaturas conllevan un aumento en la evaporación del agua oceánica, lo que supone un mayor aporte de nieve en el interior y un incremento del volumen de hielo. A pesar de ello, la pérdida de hielo glaciar es mucho mayor que la ganancia de nieve.

Flujo glaciar

Cuando una plataforma de hielo se hunde, los glaciares continentales situados detrás de la misma se precipitan hacia el mar (*véase el diagrama en la siguiente página*). Aunque el deslizamiento de los glaciares es lento, la velocidad media de avance ha aumentado notablemente.

FUENTES: ALISON COOK, UNIVERSIDAD DE SWANSEA (*datos sobre plataformas y temperatura del aire*); HAMISH PRITCHARD, *Servicio Británico de Investigación Antártica* (*mapas de elevación superficial*); «GLACIER SURGE AFTER ICE SHELF COLLAPSE», POR HERNÁN DE ANGELIS Y PEDRO SKVARCA EN *SCIENCE*, VOL. 299, 7 DE MARZO DE 2003 (*velocidades de los glaciares Drygalski y Sjögren*); «FROM ICE-SHELF TRIBUTARY TO TIDEWATER GLACIER: CONTINUED RAPID RECESSION, ACCELERATION AND THINNING OF RÖHSS GLACIER FOLLOWING THE 1995 COLLAPSE OF THE PRINCE GUSTAV ICE SHELF, ANTARCTIC PENINSULA», POR N. F. GLASSER ET AL. EN *JOURNAL OF GLACIOLOGY*, VOL. 57, N.º 203, JUNIO DE 2011 (*velocidad del glaciar Röhss*); «THE IMBALANCE OF GLACIERS AFTER DISINTEGRATION OF LARSEN-B ICE SHELF, ANTARCTIC PENINSULA», POR H. ROTT ET AL. EN *CRYOSPHERE*, VOL. 5, 2011 (*velocidades de otros glaciares*); ASESOR: THEODORE SCAMBOS, *CENTRO NACIONAL DE DATOS SOBRE NIEVE Y HIELO*; XNR PRODUCTIONS (*mapa*)



BRYAN CHRISTIE

te tomada en 1986 mostraba la plataforma Larsen Inlet, una porción de hielo de 350 kilómetros cuadrados al norte de Larsen A. Sin embargo, en otra fotografía tomada en 1988 faltaba gran parte de la plataforma. Nadie sabía explicar su desaparición.

El verano austral de 1995 comenzó a dar algunas pistas. Del mismo modo en que Larsen A había experimentado su famoso colapso, la plataforma Príncipe Gustavo, situada 60 kilómetros más al norte, también se había derrumbado. Su desintegración supuso una sorpresa absoluta, afirma Scambos, que, junto a otros científicos del Servicio Británico de Investigación Antártica, ha realizado durante muchos años un seguimiento de las plataformas antárticas vía satélite. Los efectos de tales rupturas repercuten en toda la región. En las fotografías aéreas tomadas antes de que desapareciera la plataforma Príncipe Gustavo, el glaciar Sjögren aparecía como una pluma de superficie lisa que descendía gradualmente desde el continente y avanzaba por el fiordo hacia la plataforma de hielo y el océano. Quince años más tarde, el aspecto del glaciar Sjögren se ha vuelto lamentable: presenta arrugas y grietas (*crevasses*) y la zona central se encuentra hundida. Tras la desaparición de la plataforma Príncipe Gustavo, el Sjögren se precipitó hacia el océano con una velocidad varias veces superior a su valor inicial. En la superficie se han abierto grietas transversales de 20 metros de anchura como consecuencia del estiramiento del hielo subyacente, de 600 metros de espesor, sometido a una deformación en dirección hacia el mar. Enormes icebergs se han desprendido del frente del glaciar, cuya posición ha retrocedido 15 kilómetros hacia el interior del fiordo.

En cuanto desapareció la plataforma, todos los glaciares que fluían hacia ella aceleraron de repente su movimiento. Alcanzaron velocidades dos, tres, cinco y hasta ocho veces más rápidas.

Siete veranos más tarde, en 2002, la plataforma Larsen B, al sur de Larsen A y 55 veces más extensa que Manhattan, se desintegró en centenares de fragmentos del tamaño de rascacielos. «Podíamos observar ballenas en lugares donde días antes había hielo de 300 metros de espesor», afirma Pedro Skvarca, glaciólogo del Instituto Antártico Argentino en Buenos Aires que sobrevoló el lugar poco tiempo después. «Nos quedamos boquiabiertos.»

De nuevo, la pérdida del hielo flotante conllevó la desaparición de la barrera de contención que estabilizaba los glaciares situados detrás de la plataforma. Como consecuencia, más de 150 kilómetros cúbicos de hielo glaciar se han deslizado desde el continente hacia el océano. La magnitud de la carga perdida es tal que la corteza terrestre se está levantando. Tras el colapso de la plataforma Larsen B, un dispositivo GPS clavado en el sustrato rocoso de la isla Amberes, 150 kilómetros al oeste, ha demostrado que la tasa de levantamiento tectónico casi se ha triplicado, de 0,3 a 0,8 centímetros al año.

En condiciones normales, las plataformas de hielo tienden a desmembrarse y originar grandes icebergs tabulares, en ocasiones de extensión superior al estado de Rhode Island. Pero Larsen B se rompió de un modo muy distinto. Una secuencia de siete fotografías nítidas tomadas por el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) a lo largo de 35 días demostraron que se había fragmentado en centenares de icebergs de unos 130 metros de ancho, 160 metros de espesor y un kilómetro, o más, de longitud. Los icebergs, de forma estrecha y alargada, similares a las piezas del videojuego Tetris, se desprendieron desde el borde de la plataforma hacia el océano y exhibieron secciones transversales de hielo azul. Los expertos no habían observado antes esta pauta de fragmentación.

El primer intento de Scambos y Skvarca de desentrañar aquel mecanismo de colapso tuvo lugar en marzo de 2006. Un día frío y gris, un helicóptero naval argentino les trasladó a un amplio iceberg tabular denominado UK211. Este había sobrevivido tres años desde su escisión de la plataforma Larsen C, situada 385 kilómetros al sur, pero en aquel momento se adentraba en climas cálidos, al norte de la península. Scambos y el resto del equipo pretendían utilizarlo como un análogo experimental de la ruptura de una plataforma de hielo.

El equipo instaló una estación instrumental, AMIGOS (siglas en inglés de Sistemas de Observación Automáticos de Meteorología del Hielo), que haría un seguimiento del deterioro del iceberg. Una unidad de GPS localizaría la posición de este, una estación meteorológica obtendría medidas de vientos y temperaturas, y una cámara registraría la fusión superficial. La cámara se enfocaría hacia un poste con marcas clavado en el hielo para estimar la rapidez con la que descendía el nivel de la nieve al derretirse. También se enfocaría hacia una alineación de postes que se habían dispuesto a lo largo de 2,2 kilómetros en el borde del iceberg. Una posible curvatura de la hilera indicaría que el iceberg se estaba reblandeciendo y arqueando.

Scambos y Skvarca observaron el UK211 durante ocho meses, manteniendo la comunicación con AMIGOS desde un teléfono satelital. El iceberg, cuyas dimensiones iniciales eran de 10 por 20 kilómetros, disminuyó lentamente de tamaño hasta alcanzar la mitad de su extensión inicial. El 23 de noviembre de 2006 se realizó la última comunicación con AMIGOS. Unos días más tarde, el UK211 había desaparecido y con su hundimiento se llevó la estación al fondo oceánico.

El UK211 había experimentado múltiples cambios, pero el que aconteció justo antes de su súbita desaparición fue la fusión de la nieve, que encharcó la superficie del iceberg con agua fangosa. Según Scambos, el agua se habría infiltrado hacia el interior del iceberg y lo habría desestabilizado. Sin embargo, el experimento no captó el momento de la desintegración, solo los procesos que la precedieron. Y, dado que el UK211 era un iceberg que flotaba a la deriva y no una plataforma de hielo, Scambos no pudo cuantificar el modo en que habrían evolucionado los glaciares que lo alimentaban.

EL EMPEÑO DE LOS GLACIÓLOGOS

Esas preguntas no resueltas impulsaron a Scambos a participar en 2010 en una expedición difícil, pero fundamental, hasta los restos de Larsen B, la plataforma Scar Inlet. Un altímetro láser a bordo del satélite ICESat había registrado el adelgazamiento de los glaciares que alimentaban la plataforma Larsen B y Scar Inlet, al indicar un descenso de la superficie del hielo. Pero el altímetro se había estropeado ese mismo año. Los datos de interferometría por radar de apertura sintética obtenidos por otros satélites habían permitido calcular la velocidad a la que los glaciares de las plataformas como Scar Inlet fluían hacia el mar, pero la técnica no identificaba eventos súbitos como las oleadas glaciares. Desde 2003, los satélites GRACE habían detectado pérdidas de hielo a partir de variaciones en la gravitación terrestre, pero con una precisión escasa, de centenares de kilómetros.

Scambos esperaba que la plataforma Scar Inlet colapsara al cabo de pocos días y pretendía instalar un conjunto de sensores en su superficie para captar el cataclismo. Deseaba observar el proceso desde el principio hasta el final, y con mayor detalle que el obtenido con los satélites. Se dirigía allí con el *Nathaniel B. Palmer*, un rompehielos del Programa Antártico de Estados Unidos en el que el autor también embarcó.

En enero y febrero de 2010, el *Palmer* navegó durante 57 días bordeando la península en dirección a Scar Inlet, abriéndose paso entre el hielo estacional, de hasta dos metros de espesor. Scambos y las dos docenas de científicos a bordo albergaban la esperanza de poder acercarse lo suficiente como para contestar a todas las preguntas pendientes. No obstante, pocos días después de comenzar la expedición llegaron los problemas. Por acción de las corrientes oceánicas y los vientos, el grueso hielo oceánico empujaba el buque contra la península y al *Palmer* le resultaba imposible alcanzar una distancia desde la que pudiera llegarse hasta Scar Inlet en helicóptero. Así, el 26 de enero Scambos se trasladó a una estación científica británica junto con otros cuatro glaciólogos, entre ellos Martin Truffer y Erin Pettit, de la Universidad de Alaska Fairbanks. Desde allí, un avión *Twin Otter* los llevó al primer punto de su campaña de campo. El equipo pasó tres semanas desplazándose con avión a la plataforma de hielo Scar Inlet y los glaciares que la nutrían.

En los días en los que amainaban las tormentas de nieve, los investigadores instalaron estaciones AMIGOS en Scar Inlet y en los tramos bajos del glaciar Flask (y han planeado instalar otra en 2013 en la parte baja del glaciar Leppard). En los tramos altos de ambos glaciares colocaron estaciones meteorológicas y de GPS más simples. En un risco de la costa con vistas a la plataforma Scar Inlet fijaron una cámara teledirigible.

El equipo de Scambos se sorprendió de las condiciones en que se hallaba Scar Inlet. Al excavar en los alrededores del campamento, sus palas se hundían en el vacío: finas capas de nieve cubrían grietas que atravesaban el hielo. Un día, el piloto del avión se hundió hasta la cintura en una grieta oculta. Esas brechas debían de hallarse antes enterradas bajo un mayor grosor de nieve que más tarde se habría fundido durante los veranos cálidos. En consecuencia, las grietas se habían vuelto superficiales, tal y como Brückner y sus soldados habían observado durante los últimos días de Larsen A.

En algún verano próximo, la plataforma Scar Inlet superará un umbral crítico. Los continuos ciclos de fusión y recongelación endurecerán la superficie de modo que llegará a albergar grandes lagos de agua fundida que penetrará en las grietas expuestas. A medida que el agua se acumule en el interior, su peso hará que las grietas se hagan más profundas, hasta que alcancen la base del hielo y se desgaje una nueva pieza del iceberg. La ruptura de una grieta producirá una onda de choque que provocará otras rupturas en las zonas más próximas al borde continental. La plataforma podría desintegrarse por completo en cuestión de escasos días, quizá tan solo horas.

Así estima Scambos el modo en que Scar Inlet terminará sus días. La estación AMIGOS le permitirá corroborar su teoría. Sus cámaras captarán la formación de lagos de fusión, la apertura

de grietas y el drenaje del agua de los lagos a través de ellas. Las fotografías de las alineaciones de postes mostrarán la curvatura y la deformación de la plataforma. La cámara colocada en lo alto del risco grabará el patrón de fragmentación de los icebergs. Las estaciones AMIGOS en los glaciares Flask y Leppard mostrarán la aceleración de los glaciares al derrumbarse la plataforma que los retiene. Al disponer de estaciones en los tramos altos y bajos de cada glaciar, Scambos observará la respuesta dinámica de estos. Es decir, la manera en que la sección inferior del glaciar comienza a acelerarse antes de que lo haga su parte superior, lo que conlleva un estiramiento, adelgazamiento y agrietamiento, tal y como ocurrió en el glaciar Sjögren.

EN BUSCA DE DATOS

Los glaciares de la península antártica que han perdido su plataforma están experimentando un rápido adelgazamiento que alcanza tasas de entre 5 y 10 metros al año. Los datos proceden de las medidas de altimetría láser realizadas desde el desaparecido ICESat y, más recientemente, desde aeroplanos. La principal cuestión es saber cómo es esa tasa en comparación con el adelgazamiento gradual que viene sucediendo desde el final de la última glaciación, hace 12.000 años, y en particular, si los recientes colapsos de plataformas cuentan con algún precedente. Greg Balco, geólogo del Centro de Geocronología de Berkeley que navegó a bordo del *Palmer*, pretendía responder dicha pregunta.

Una mañana fría y nublada, un helicóptero nos transportó a Balco y a mí desde el *Palmer* hasta el glaciar Sjögren, ubicado 30 kilómetros al oeste. El fiordo Sjögren había albergado hielo de 600 metros de espesor hasta hacía muy poco, en 1995, justo antes de que la plataforma Príncipe Gustavo se derrumbara. En su lugar, el fiordo contiene hoy agua marina.

El helicóptero nos dejó en una montaña pelada en un lado del fiordo. El sustrato rocoso de la cumbre, de estratos grises y blancos, se había erosionado hasta adoptar suaves superficies curvas y se hallaba surcado por rasguños, cicatrices dejadas por un glaciar Sjögren más joven y grueso al deslizarse sobre aquel terreno, hace miles de años. Por todo el terreno había piedras diseminadas (bloques volcánicos, rocas de material granítico, etcétera) cuya composición no se correspondía con la del sustrato subyacente. El glaciar Sjögren los había transportado desde lugares más lejanos hasta su ubicación actual, a medida que el hielo se fundía.

Balco utilizó aquellas rocas ajenas para determinar la velocidad a la que el glaciar Sjögren había perdido grosor en los últimos milenios. Subió la montaña y recogió muestras de rocas a distintas alturas. Al regresar de la expedición, las analizó para estimar el tiempo que llevaban expuestas a la luz solar. Lo hizo mediante la medida de la concentración de un isótopo infrecuente, el berilio 10, que se forma cuando los rayos solares inciden sobre una roca. A partir de esos datos, Balco dedujo la velocidad de adelgazamiento del glaciar y la consiguiente reexposición de la montaña.

Un año después de la expedición, Balco había analizado las rocas recogidas de dos glaciares, Sjögren y Drygalski. Sus resultados pusieron de manifiesto que estos habían experimentado notables retrocesos al menos una vez en los últimos 4000 años. Ello indicaba que las plataformas Príncipe Gustavo y Larsen A habían sufrido al menos un colapso en dicho período de tiempo.

Balco nunca alcanzó la plataforma Larsen B debido a las adversidades que sufrió el barco a causa del hielo, pero Eugene Domack, geólogo marino que dirigió la expedición de 2010, ha estimado la edad de la plataforma. Domack, catedrático de ciencias ambientales en la Universidad de Hamilton, había logrado llegar a la región en campañas anteriores. Su equipo había perforado varias columnas de sedimentos de tres metros de longitud en zonas del suelo oceánico que habían estado cubiertas por Larsen B antes de que se hundiera. Los testigos obtenidos en el océano abierto suelen presentar manchas verdes debido a ciertas algas microscópicas, las diatomeas, que se depositan en el fondo del mar después de morir. Pero aquellos testigos carecían de ellas; cada fina capa de lodo arenoso originada por la erosión glaciar evidenciaba que Larsen B había cubierto el área durante al menos 11.000 años. Las capas de los testigos se dataron mediante análisis de carbono 14 en las conchas dejadas por unos organismos microscópicos, los foraminíferos.

El sondeo de Domack solo abarcaba los últimos 11.000 años. Sin embargo, el científico afirma que Larsen B podría haber existido desde hace 100.000 años, el comienzo de la última glaciación. Los resultados de Balco y Domack revelan que, en el pasado reciente, las plataformas más septentrionales de la península antártica han desaparecido y reaparecido varias veces. Pero el hecho de que los colapsos de plataformas vayan avanzando hacia el sur, desde el extremo de la península hacia el continente, donde se encuentran Larsen B y Scar Inlet, constituye una anomalía histórica.

COLAPSO Y ACELERACIÓN

Dieciocho meses después de que el *Palmer* regresara a puerto en Punta Arenas, en Chile, Scambos examinó los datos que le llegaban vía satélite, en tiempo real, a su oficina de Boulder. La plataforma Scar Inlet no se había derrumbado todavía, pero los instrumentos incrustados en el suelo habían revelado otros sucesos inesperados. Los científicos habían supuesto que aunque las plataformas de hielo se vieran sometidas a veranos extremos, los inviernos volverían a aportarles nieve. Sin embargo, cuando Scambos y su equipo regresaron en noviembre de 2010 para reparar la estación, hallaron un entramado de grietas expuestas demasiado intrincado para que su avión pudiera aterrizar. En los sobrevuelos del *Twin Otter* aún podían observarse las huellas dejadas por sus botas y sus esquíes hacía nueve meses. El invierno, que debería haber aportado nieve nueva a Scar Inlet, la había dejado un paso más cerca del colapso.

Otro de los eventos inesperados se había producido aquel mismo año entre el 14 y el 15 de julio, en la oscuridad del invierno polar. La estación AMIGOS situada sobre Scar Inlet registró una ola de calor. La temperatura ascendió 43 ºC hasta alcanzar los 10 ºC. El calor se debía a los vientos del oeste, llamados *foehn*, generados por el aire comprimido y caliente que descendía por las montañas de la península. Al mismo tiempo, los termistores enterrados varios metros en el hielo cerca de la estación AMIGOS registraban un pulso de calor que indicaba una infiltración del agua fundida.

Se desconoce la frecuencia de los *foehn*, aunque Scambos considera que nos podrían estar pasando inadvertidos algunos hechos relevantes. La velocidad media de los vientos que soplan desde las costas antárticas se ha incrementado entre un 10 y 15 por ciento en los últimos 30 años. En la actualidad, el viento barre cada año entre 50.000 y 150.000 millones de toneladas métricas de nieve desde la superficie antártica hacia el océano, donde se funde. Si los vientos se intensifican, cabe esperar un aumento del material barrido, lo que podría empeorar de un modo imprevisto el futuro de las plataformas de hielo.





Obtención de datos: **Un helicóptero transporta instrumentos científicos hasta los glaciares que se están deslizando hacia el mar (*arriba*). Un testigo de sedimentos de gran longitud recuperado del fondo oceánico en la bahía Barilari (*abajo*) podría ayudar a determinar los períodos en los que el agua ha quedado cubierta por plataformas de hielo durante los últimos siglos.**

Además, tres unidades de GPS que Domack había atornillado en los afloramientos rocosos del perímetro de Larsen B y Scar Inlet demuestran que la región experimenta un ascenso anual de 1,8 centímetros. La desaparición de los glaciares pesados trae consigo un rebote de la corteza terrestre subyacente muy rápido. La tasa de levantamiento tectónico se incrementará cuando se derrumbe la plataforma Scar Inlet y los glaciares retenidos por ella se precipiten hacia el océano. Según Domack, si se mide el levantamiento se puede determinar la cantidad de hielo volcado en el mar. Si ello se hace en Scar Inlet, se podrá predecir mejor la cantidad de hielo que desaparecerá a medida que otras plataformas sucumben más al sur.

En el futuro se prevé el colapso de un número creciente de plataformas. Un valor medio estival de 0 ºC representaría la temperatura máxima a la que una plataforma puede existir. Y la isoterma correspondiente a ese valor se está desplazando hacia el sur, desde el extremo de la península antártica hacia el continente, a la vez que asciende la temperatura media anual. Cada plataforma que ha quedado al otro lado de la isoterma se ha desmoronado al cabo de unos diez años. La siguiente en verse afectada, al sur de Larsen B y Scar Inlet, es la plataforma Larsen C, que abarca 49.000 kilómetros cuadrados, dos veces más extensa que el estado de Maryland y unas 820 veces la superficie de Manhattan. El volumen de hielo glaciar que fluye hasta Larsen C supera el volumen total de hielo de todas las plataformas que ya se han hundido. En verano ya se observan lagos de fusión en su extremo norte.

Aún más preocupación despierta el estado de las plataformas unidas al continente y que retienen glaciares mucho más grandes, como los de la isla de Pinos, Thwaites y Totten. En lugar de fundirse gradualmente desde la zona superior hacia la inferior, se están derritiendo las zonas laterales más bajas debido a la acción de corrientes oceánicas cálidas. El resultado es el mismo: el glaciar de la isla de Pinos ha reducido su espesor solo un 15 por ciento desde 1994, pero el movimiento del enorme glaciar a sus espaldas se ha acelerado en un 70 por ciento.

Deberá pasar algún tiempo hasta que se conozcan en profundidad los efectos del colapso de una plataforma en la desaparición de los glaciares. Un estudio publicado en 2011 por Scambos, Truffer y Pettit demostró que un glaciar continúa acelerándose hasta 15 años después de que haya perdido su plataforma: el glaciar Röhss (que llegaba hasta la plataforma Príncipe Gustavo) ha alcanzado ahora una velocidad nueve veces mayor a la inicial.

La aceleración del glaciar podría aclarar una reciente observación realizada por Eric Rignot e Isabella Velicogna, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. Ambos demostraron que actualmente la tasa de pérdida de hielo antártico aumenta unos 25 kilómetros cúbicos al año. Los cálculos realizados por el IPCC en 2007, que auguraban un ascenso del nivel del mar de 18 a 59 centímetros hacia el 2100, no tuvieron en cuenta los efectos de las plataformas de hielo. Según Rignot, las estimaciones probablemente se equivocan en un factor de dos o tres, y postula un ascenso del nivel del mar de un metro. Un análisis publicado en 2009 por Martin Vermeer, de la Universidad Tecnológica de Helsinki, acota la predicción entre 75 y 190 centímetros.

Tales indicios exigen un mayor seguimiento de la región Larsen, una zona que castiga a quien trata de desvelar sus secretos. Antes de la expedición a bordo del *Palmer* en 2010, Domack había navegado por el área en otros cinco buques de investigación, tres de los cuales nunca alcanzaron su destino debido a la severidad del hielo oceánico. Pero a pesar de las adversidades, él y Scambos tienen razones de peso para regresar allí una vez más.

PARA SABER MÁS

Glacier surge after ice shelf collapse. Hernán De Angelis y Pedro Skvarca en *Science*, vol. 299, págs. 1560-1562, 7 de marzo de 2003.

Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic peninsula during the Holocene epoch. Eugene Domack et al. en *Nature*, vol. 436, págs. 681-685, 4 de agosto de 2005.

Calving and ice-shelf break-up processes investigated by proxy: Antarctic tabular iceberg evolution during northward drift. T. Scambos et al. en *Journal of Glaciology*, vol. 54, n.º 187, págs. 579-591, diciembre de 2008.

Ice sheet change detection by satellite image differencing. R. Bindschadler, T. Scambos, H. Choi y T. Haran en *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n.º 7, págs. 1353-1362, 2010.

MEDICINA

El médico detective

William A. Gahl desentraña la causa de enfermedades que han dejado perplejos a otros médicos

Entrevista realizada por Brendan Borrell

La paciente había soportado veinte años de dolor, sus pantorrillas se habían convertido en dos ladrillos y ahora caminaba con dificultad. Un buen número de médicos no había acertado con el tratamiento ni conseguido diagnosticar su extraña dolencia. Por fin, cuando sus radiografías llegaron a la mesa de William A. Gahl, en el Instituto Nacional de Salud de EE.UU., este supo de inmediato que tenía que hacerse cargo del caso.

Gahl es el médico que encabeza el Programa de Enfermedades no Diagnosticadas, el cual intenta desentrañar las causas y encontrar el tratamiento de trastornos misteriosos y enfermedades conocidas, pero raras. Las radiografías de Louise Benge mostraron que los vasos sanguíneos de sus piernas y pies presentaban un notable depósito de calcio que disminuía el riego sanguíneo. La hermana de Benge, Paula Allen, así como otros miembros de su familia, también manifestaban esta alteración. Meses después, Gahl identificó el origen genético de la misma, una mutación de un gen regulador del calcio, y prescribió un tratamiento con fármacos ya existentes en el mercado. Continúa evaluando la eficacia del tratamiento.

EN SÍNTESIS

William A. Gahl investiga las causas de enfermedades raras a través del Programa de Enfermedades no Diagnosticadas del estadounidense Instituto Nacional de la Salud.

Para desentrañar tan misteriosos trastornos, aplica técnicas médicas avanzadas y ahonda en las conexiones entre genética y patología.

En esta entrevista, Gahl relata su experiencia y remarca las diferencias entre la investigación en el laboratorio y el trato humano con los pacientes.


ERIKA LARSON

Gahl se decantó por el trabajo de médico detective debido a una pasión temprana por el tipo de rompecabezas que plantea una disciplina radicalmente diferente. Aspiraba a convertirse en matemático, hasta que asistió a un curso de bioquímica en el Instituto Tecnológico de Massachusetts durante su segundo año en la universidad. En esa época, los científicos empezaban a reconocer que había un elevado número de enfermedades genéticas raras, responsables de terribles deformidades físicas y de retraso, originadas por un único enzima defectuoso.

El reto que suponía resolver los rompecabezas médicos y ayudar a los enfermos atrajo a Gahl, quien, antes de emprender el Programa de Enfermedades no Diagnosticadas en 2008 en el Instituto Nacional de Salud, realizó descubrimientos clave en el tratamiento de la cistinosis, del síndrome de Hermansky-Pudlak (albinismo) y otras alteraciones poco conocidas.

Aunque Gahl dispone de la tecnología médica más avanzada y ha presionado a la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense con el fin de mejorar la disponibilidad de tratamientos para los pacientes con enfermedades raras, contempla con resignación las restricciones impuestas a la medicina por un mundo en el que los costes de la salud parecen ir en una sola dirección. A continuación se ofrece un extracto de una entrevista reciente en la que Gahl abordaba los problemas a los que se enfrenta como médico detective y en calidad de defensor de sus pacientes y otros como ellos.

Si las consideramos por separado, las enfermedades raras son muy poco frecuentes; pero en conjunto, no lo son

¿Cómo deciden qué casos van a aceptar?
Queremos hacer diagnósticos, pero también que la medicina y la ciencia avancen. Consideramos si un paciente puede sufrir una enfermedad nueva y si hemos tenido la suerte de encontrar sus bases genéticas y bioquímicas. Contamos con la valoración experta de nuestros asesores, muchos de los cuales son especialistas en esa sintomatología concreta. Ellos me dan su opinión y yo tomo la decisión final sobre qué casos aceptar.

He de decir que el noventa por ciento de las veces la decisión de aceptar un caso o no hacerlo resulta fácil. En unos pocos casos es muy duro. Hemos aceptado 400 de los 1700 recibidos.

¿Cómo les localiza la gente por primera vez?
Generalmente oyen hablar de nosotros a través de la prensa y de grupos de apoyo. Algunos de nuestros colaboradores han oído hablar del programa; por supuesto, esos son los mejores casos. Cualquiera puede, en la medida en que lo considere oportuno, hacernos llegar su historial médico y una carta de su médico.

Tras aceptar a Louise Benge y a su hermana como pacientes, ¿cuál fue el primer paso?
En ese momento ya habíamos visto sus radiografías y otras pruebas médicas. Tuvieron que trasladarse a Bethesda durante una semana para que realizáramos nuestras propias pruebas y obtuviéramos muestras biológicas. Ya que sus padres estaban sanos, sabíamos que la enfermedad la había causado una mutación recesiva. Cada progenitor debía de poseer solo una copia de la mutación genética, mientras que los hijos afectados tendrían las dos copias. Primero identificamos la región del genoma en donde se alojaba la mutación y después utilizamos la secuenciación dirigida para encontrar un error en un gen específico, *NT5E*, implicado en la producción del nucleósido adenosina (relacionado con una gran variedad de procesos bioquímicos). Hallamos también otras dos familias con una alteración similar e identificamos sus mutaciones.

Una vez identificada la mutación, ¿ya han terminado?
No, el paso siguiente consiste en relacionar la genética con la patología. En el laboratorio de Manfred Boehm, Cynthia St. Hilaire, experta en biología celular y molecular del aparato cardiovascular, cultiva las células de la piel de las pacientes para someterlas a una serie de experimentos in vitro. Al insertar en las células una copia normal de *NT5E*, se vio que estas funcionaban con normalidad. A continuación se realizó un segundo experimento: se añadió adenosina a las células y se comprobó que la calcificación también disminuía. Estos experimentos nos permitieron comprender mejor la función que desempeñaba la adenosina en la regulación del calcio. Por diversos motivos, no podemos dar adenosina a los pacientes, pero pensamos que podemos tratar su alteración con bisfosfonatos, un tipo de fármacos para la osteoporosis. Estamos pendientes de ver si funcionan.

Usted ejerce dos profesiones, médico y científico. ¿Cuál es la diferencia entre ver a un paciente y hacer ciencia?
Uno tiene que ser desapasionado y apasionado a la vez en ambos mundos. Atender a un paciente es más complicado que hacer ciencia, ya que el ser humano tiene muchas facetas. Está la familia, la relación contigo, la confianza o la falta de ella y la esperanza, por lo que se requiere mucha constancia y responsabilidad. Podemos abandonar un experimento, pero no a un paciente.

Puedes llegar a sentirte emocionalmente vinculado a los pacientes, pero no debes propasarte, porque muchos de ellos morirán. Es preciso llegar a un equilibrio en la relación entre el médico y el paciente, que es muy diferente a la relación que estableces con tu laboratorio cuando llevas a cabo experimentos. Pero también necesitas un componente pasional en tu investigación; de lo contrario, te darás por vencido demasiado pronto.

¿Cómo mantiene su compasión ante casos tan duros?
Bien, es un problema, y es un problema para los médicos en general, porque no estamos acostumbrados al fracaso. Y he tenido que aceptar que es inevitable en algunos casos. Nos aferramos a los éxitos, aunque sean pocos, para mantenernos a flote frente a las decepciones que cosechamos. Intento no pensar en los reveses, sino en los casos que hemos resuelto o en la gente a la que hemos ayudado.

Durante los últimos tres años hemos oído hablar mucho acerca del coste creciente de la asistencia médica. ¿Qué obligación tiene una sociedad con recursos limitados de tratar pacientes con enfermedades raras?
Si las consideramos por separado, las enfermedades raras son muy poco frecuentes; pero en conjunto, no lo son. Me atrevería

a decir que prácticamente cada persona en este país tiene a algún familiar o a un amigo con una enfermedad rara.

Creo que una sociedad se mide y se juzga por el modo en que trata a sus miembros menos afortunados. Los pacientes con enfermedades raras son personas abandonadas. Son abandonadas por los profesionales de la medicina y, muchas veces, aislados por sus propios familiares y amigos porque no pueden poner nombre a su trastorno. Muchos de ellos acudirán a la consulta de su médico y este no querrá verlos, porque sin un diagnóstico, los médicos se sienten muy incómodos y fuera de lugar.

Hay casos en los que confirmaremos el peor pronóstico temido por el paciente y nos lo agradecerán, e incluso nos abrazarán por ello, ya que entonces tienen alguna idea de lo que les pasará en el futuro. La incertidumbre ha terminado. Pueden ponerle una etiqueta a su trastorno. Ello sucede a muchísimas personas, más de las que nunca imaginé.

También hay que señalar que, en ocasiones, los hallazgos en una enfermedad rara pueden aplicarse en las comunes. Al estudiar el caso de Louise Benge, descubrimos una secuencia nueva que alteraba la calcificación en los vasos sanguíneos y en los huesos. Este descubrimiento puede estar implicado en patologías cardiacas en las que el calcio se deposita en las arterias coronarias y restringe el riego sanguíneo.

¿Ha calculado alguna vez cuánto cuesta un diagnóstico individual en su programa?

En los dos primeros años, mi servicio atendió a 160 pacientes y llevó a cabo 50 diagnósticos, 15 de ellos referidos a enfermedades muy poco frecuentes. El coste ascendió a cinco millones de dólares, unos cien mil dólares por caso. Hay que tener en cuenta que algunos de estos pacientes ya habían ocasionado unos gastos de un millón de dólares. Habían acudido a la Clínica Mayo, a la Clínica Cleveland, al Johns Hopkins, a Harvard y a Stanford, antes de venir a nosotros.

Por otra parte, nuestro trabajo proporciona otros beneficios añadidos. Hemos descubierto una nueva enfermedad y el programa ha sentado las bases para encontrar otras muchas. También sabemos más sobre algunas patologías (como el trastorno congénito de la glucosilación de tipo 2B) y hemos identificado la mutación responsable de una enfermedad neurológica que conlleva una ataxia espinocerebelosa y una paraplejia espástica.

En aquellos casos en los que no dimos un diagnóstico, infundimos esperanza y proporcionamos un tratamiento sintomático, por lo que pienso que el dinero estaba bien gastado.

Sin embargo, ¿debe haber un límite de financiación establecido por su grupo?

No tenemos muchas restricciones en cuanto a la forma de gastar nuestro dinero; sabemos que contamos con una cantidad determinada en nuestro fondo. Por tanto, hemos de tomar decisiones sobre lo que elegimos, igual que hace la gente a vida o muerte en un campo de batalla. La decisión dependerá de los recursos monetarios que tengamos y del tiempo del cual dispongan los médicos.

Cuando calibramos el valor de un diagnóstico, lo hacemos frente al del próximo paciente o al de otras diez personas. En general, todos los pacientes quieren que porfiemos en busca de su diagnóstico. Y debemos tomar decisiones importantes. No secuenciamos todo el genoma, sino las porciones codificantes, conocidas en conjunto como exoma. Por otro lado, podemos avanzar más si gastamos una mayor cantidad de dinero y secuenciamos a una familia entera. Valoramos tanto la probabilidad de éxito como el coste económico.

Si los médicos quisieran comenzar a solicitar secuenciaciones del exoma en su práctica diagnóstica, ¿se plantearían cuestiones legales?

En la actualidad, no está aprobada la realización, como prueba, de la secuenciación completa del exoma en un laboratorio clínico. La utilizamos para localizar el gen responsable de la enfermedad, con un coste de unos cuatro mil dólares. Este precio está bajando rápidamente. Una vez que estamos bastante seguros de cuál es el gen, pedimos la prueba certificada y se paga por ella. Entonces podemos darle el diagnóstico al paciente. Ahora mismo, si los médicos visitan a un paciente con una enfermedad degenerativa, como una ataxia espinocerebelosa, que puede deberse a numerosas causas genéticas conocidas, pueden pedir análisis a empresas especializadas en diagnóstico molecular, que tienen patentadas las pruebas de cada uno de esos genes por separado. Esto puede costar decenas de miles de dólares.

Lo que está pasando, creo, es que las compañías que realizan secuenciaciones empiezan a interpretar sus resultados para los médicos y, en tal caso, los aspectos legales comienzan a entrar en juego.

¿Le preocupan otras cuestiones que puedan surgir cuando la secuenciación del genoma completo se halle más extendida?

¿Como que se detecte un factor de riesgo de discapacidad y ese factor de riesgo figure en el expediente del paciente y de alguna manera las compañías de seguros tengan acceso a él? Estas son las cosas que podrían derivar de la secuenciación completa del genoma y creo que nuestra sociedad debe plantearse cómo vamos a proteger a los pacientes de la discriminación que ello pueda generar. Cuando las personas se someten a la secuenciación de su genoma o de su exoma completos, se les debe dar la oportunidad de decidir cómo serán tratados esos datos.

A menudo se le ha comparado con el doctor Gregory House, el médico detective de la serie de ficción televisiva adicto a la Vicodina. ¿Alguna vez han contactado con usted los responsables de esta serie?

No creo que quieran contactar conmigo. Fui entrevistado en la CNN y me preguntaron si me compararía con el doctor House. Dije: «Bien, no lo haría, porque no soy un sociópata ni me drogo». La principal diferencia, sin embargo, es que nuestros pacientes sufren enfermedades crónicas que no pueden resolverse en sesenta minutos. Son historias reales de interés humano. No son inventadas.

Brendan Borrell *escribe sobre ciencia y medioambiente. Es colaborador habitual de* Scientific American *y* Nature.

PARA SABER MÁS

NT5E mutations and arterial calcifications. Cynthia St. Hilaire et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 364, n.º 5, págs. 432-442, 3 de febrero de 2011.

The NIH undiagnosed diseases program. William A. Gahl y Cynthia J. Tifft en *Journal of American Medical Association*, vol. 305, n.º 18, págs. 1904-1905, 11 de mayo de 2011.

Ferdi Schüth es director del Instituto Max Planck para la Investigación del Carbón. Trabaja en procesos de catálisis relevantes para el suministro energético, como la activación del metano, la transformación de biomasa o el almacenamiento de hidrógeno.



ENERGÍA

Sistemas de almacenamiento energético

Los combustibles fósiles no solo generan electricidad, sino que constituyen excelentes reservas químicas de energía. La red del futuro deberá suplir esa capacidad de acopio con otros medios

Ferdi Schüth

El cambio de modelo energético puede considerarse una realidad en marcha. Cabe esperar que gran parte del suministro eléctrico del futuro proceda de fuentes renovables, ya se trate del viento, el agua o la irradiación directa del sol. Sin embargo, el rendimiento de estas formas de generación de electricidad queda a merced de las variaciones meteorológicas, motivo por el que presenta grandes oscilaciones temporales. Por tanto, en el futuro habremos de apostar por sistemas de almacenamiento que nos permitan acumular los excedentes obtenidos durante los picos de producción, a fin de suministrar esa energía a la red cuando no sople el viento, no corra el agua o no brille el sol.

EN SÍNTESIS

Un suministro energético basado en fuentes renovables deberá hacer frente a grandes fluctuaciones en la generación de electricidad. Ello requerirá sistemas de almacenamiento que estabilicen la red y permitan aprovechar los excedentes de producción.

Existen diversas técnicas de almacenaje: mecánicas, térmicas, electroquímicas y químicas. Algunas son de eficacia probada, como el hidrobombeo, mientras que otras se encuentran en fase de desarrollo. Cada método presenta sus propias ventajas e inconvenientes.

Cabe esperar que la red eléctrica del futuro funcione con una mezcla coordinada de diferentes depósitos energéticos según deban propulsar vehículos, compensar los picos ocasionales o cubrir las variaciones estacionales de producción y demanda energéticas.

El problema del almacenamiento apenas se había planteado hasta ahora debido a que el petróleo, el gas natural o el carbón no solo son combustibles de muy elevado rendimiento, sino también excelentes reservas energéticas. El poder calorífico del gas natural o el diésel asciende a entre 10 y 14 kilovatios hora por kilogramo, frente a los 0,2 que almacena una batería de iones de litio. La mayoría de las fuentes renovables de energía, sin embargo, proporcionan energía eléctrica, pero ningún compuesto químico que haga las veces de almacén. Los rotores eólicos y las turbinas hidráulicas accionan generadores eléctricos; las placas fotovoltaicas crean una diferencia de potencial que permite establecer una corriente, y las centrales termosolares calientan un medio a altas temperaturas que, después, se emplea para propulsar una turbina. Dadas las dificultades para almacenar energía, el constante aumento de la proporción de renovables en la mezcla de generación eléctrica plantea un desafío de enormes proporciones, pues producción y demanda deben hallarse siempre en equilibrio a fin de evitar daños en la red.

Como ejemplo, consideremos la cantidad de electricidad que los aerogeneradores alemanes suministraron en abril de 2011 a la compañía 50Hertz: en el espacio de unos días, la potencia llegó a oscilar en hasta ocho gigavatios, el equivalente a la potencia nominal de seis centrales nucleares de gran tamaño. En varias ocasiones, el exceso en la producción eólica ha llegado a provocar que el precio de la electricidad alcance valores negativos, puesto que otras centrales no pudieron desconectarse a tiempo para compensar el pico de generación.

Tales oscilaciones deberían poder amortiguarse con un sistema de almacenamiento adecuado. No obstante, para operar con eficacia, dicho sistema habría de satisfacer un abanico de requisitos muy amplio. Por un lado, los picos de corta duración —ya sean en la producción o en la demanda— no suelen prolongarse durante más de unos días. En un país como Alemania, podría hacérseles frente con una capacidad de almacenamiento de algunos cientos de gigavatios hora.

Sin embargo, la mayor parte de las zonas del mundo se enfrentan también a grandes variaciones estacionales: debido al uso de la calefacción, el consumo eléctrico en Alemania aumenta en invierno en torno a un 10 por ciento, lo que obliga al país a quemar más del doble de gas natural que en verano. En cam-

VATTENFALL EUROPE AG



Central de hidrobombeo en las inmediaciones del municipio alemán de Goldisthal. Estos sistemas de almacenamiento gozan de una eficiencia elevada, pero su aplicabilidad a gran escala se ve limitada por la dificultad para encontrar emplazamientos adecuados.

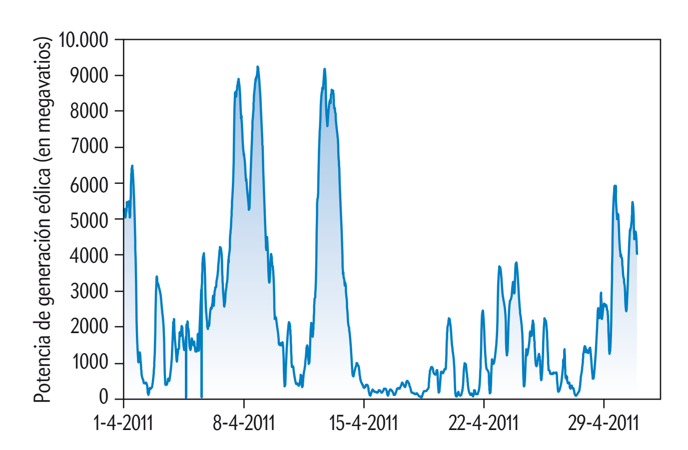
bio, en EE.UU. ocurre a la inversa: como consecuencia del uso generalizado de aire acondicionado, la demanda energética durante el estío supera en un 20 por ciento a la de los meses de invierno. Pero la generación con renovables no se ajusta a los vaivenes estacionales que experimenta el consumo, por lo que las compañías se ven obligadas a contar con centrales de apoyo, a fin de suministrar la energía necesaria durante las épocas de mayor demanda. Si tales diferencias hubiesen de cubrirse con sistemas de almacenamiento, estos deberían acumular cantidades descomunales de energía, del orden de cientos de miles de gigavatios hora. A tal efecto, casi la única posibilidad que cabe considerar hoy en día son los sistemas de almacenamiento químicos, ya que la capacidad de los almacenes electroquímicos (baterías) o los mecánicos (hidrobombeo o aire comprimido) resulta muy inferior.

En otro orden de necesidades, los futuros vehículos eléctricos necesitarán dispositivos de almacenamiento pequeños, transportables y con una capacidad del orden de diez o cien kilovatios hora: millones de veces menor que la de los sistemas requeridos para alimentar la red. El reto que plantean es, por tanto, completamente distinto. Aquí el obstáculo principal reside en que la densidad energética de la que gozan los enlaces químicos de los hidrocarburos (las moléculas que componen la gasolina o el diésel) apenas puede alcanzarse con ninguna otra técnica. Ello explica la poca autonomía de los automóviles eléctricos modernos en comparación con la de los vehículos de combustión.

ALMACENAMIENTO MECÁNICO

La energía eléctrica puede transformarse con relativa facilidad en energía mecánica, y viceversa. Las centrales hidroeléctricas reversibles, o de hidrobombeo, se basan en este principio. Los excedentes de energía se emplean en bombear agua desde una reserva situada a un nivel bajo hasta otra más elevada. Después, esa agua se deja caer y, en su recorrido de descenso, acciona turbinas que generan corriente eléctrica.

La cantidad de energía almacenada en la reserva de agua viene dada por su energía potencial, la cual depende de la diferencia de altura h entre ambos depósitos y de la masa de agua m de acuerdo con la expresión $E = mgh$, donde g denota la aceleración de la gravedad sobre la superficie terrestre (unos 10 metros por segundo al cuadrado). Para una diferencia de altura de 300 metros, un metro cúbico de agua almacenará por tanto unos 3 millones de julios; es decir, 0,8 kilovatios hora. En Alemania, las centrales de hidrobombeo suman una capacidad conjunta de 38 gigavatios hora. Si lo comparamos con el consumo del país, unos 600.000 gigavatios hora al año, comprobaremos que todas esas instalaciones apenas proporcionarían energía a la nación durante media hora. Por tanto, jamás bastarán para acompasar oferta y demanda durante un desfase de varios días.



Fluctuaciones de generación eólica de la compañía eléctrica alemana 50Hertz durante el mes de abril de 2011. En apenas unos días, las oscilaciones llegaron a los 8000 megavatios, el equivalente a la potencia de seis centrales nucleares.

El problema con el hidrobombeo radica en sus dificultades para aplicarlo a gran escala, dada la dificultad para encontrar emplazamientos adecuados en los que levantar este tipo de centrales [*véase* «Centrales eléctricas reversibles de muro circular», por Matthias Popp; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2012]. No obstante, presentan una eficiencia muy elevada, ya que por lo general recuperan entre el 75 y el 80 por ciento de la energía invertida. Además, forman parte de las técnicas de almacenaje más económicas.

Otro método mecánico de almacenamiento lo proporcionan los depósitos de aire comprimido. En estas instalaciones, la electricidad sobrante se emplea para introducir aire en cavidades herméticas subterráneas y elevar su presión hasta los 70 bares. Después, el depósito se abre, el gas escapa a gran velocidad y, a su paso, acciona una turbina de gas. En todo el mundo, existen dos grandes instalaciones de este tipo en funcionamiento: una en la ciudad alemana de Huntorf y otra en Alabama. La cantidad de energía almacenada depende del tamaño de las cavidades subterráneas y de la presión del aire. En un depósito de cientos de miles de metros cúbicos de volumen pueden almacenarse varios gigavatios hora.

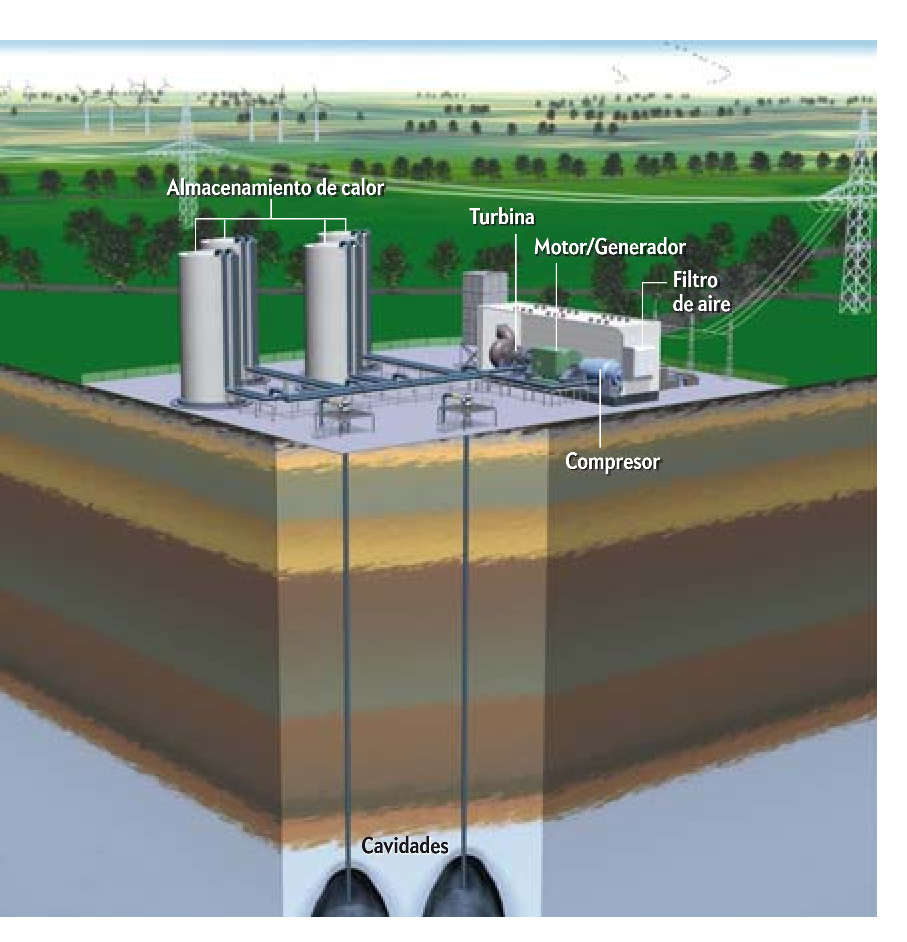
Si el calor generado durante la compresión no se almacena para calentar después el aire en expansión (a fin de que este no se enfríe demasiado en el proceso), el rendimiento de la técnica se ve mermado de manera considerable. Sin embargo, este modo de operación, denominado funcionamiento adiabático, resulta complicado de implementar. Las centrales de Huntorf y Alabama no lo incorporan, por lo que su eficiencia se limita al 40 y al 54 por ciento, respectivamente. Para un depósito adiabático, los expertos calculan un rendimiento teórico del 70 por ciento, si bien subsisten dudas sobre las posibilidades de llevarlo a la práctica.

En comparación con las centrales hidroeléctricas reversibles, las de aire comprimido presentan una gran ventaja: apenas perturban el paisaje, pues tan solo el edificio de turbinas y, en su caso, el sistema de almacenamiento de calor, asoman a la superficie. Cabe esperar que las futuras instalaciones de este tipo sufran menos problemas de autorización que las grandes instalaciones de hidrobombeo. Existen otros sistemas de almacenamiento mecánicos, como los volantes de inercia. Estos, sin embargo, solo acumulan pequeñas cantidades de energía y arrostran pérdidas considerables a causa de la fricción, por lo que su uso se limita a estabilizar la red.

ALMACENAMIENTO TÉRMICO

En general, transformar el calor en otras formas de energía implica pérdidas notables. El ciclo de Carnot impone un límite máximo a la eficiencia de cualquier máquina térmica que tome calor de un foco caliente y lo ceda a uno frío. Ese rendimiento óptimo viene dado por $\eta = 1 - T_f/T_c$, donde T_f denota la temperatura del foco frío y T_c, la del caliente (ambas en grados Kelvin). Así, cuanto menor sea la diferencia de temperaturas, menos eficiente será la transformación de calor en cualquier otra

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN F. SCHÜTH



Esquema de una central de aire comprimido. Los excedentes de producción energética se usan para bombear aire hacia cavidades subterráneas. Durante los picos de demanda, el aire se evacua y, en su camino de salida, acciona generadores. La eficiencia del sistema aumenta si el calor liberado durante la compresión se almacena temporalmente y se reinyecta durante la descarga.

RWE/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

forma de energía. Además, el rendimiento de una máquina real suele resultar considerablemente menor que el límite teórico impuesto por el ciclo de Carnot. Por ello, la energía calorífica que más tarde deba usarse como tal también debería almacenarse, a fin de evitar las pérdidas asociadas a todo proceso de transformación.

Un almacén calorífico puede operar con calor sensible o con calor latente. En el primer caso, la entrega de calor se invierte en elevar la temperatura del material de almacenamiento, como ocurre cuando ponemos un recipiente con agua líquida al fuego. Tales almacenes se benefician de una constitución muy simple, pero necesitan un buen aislamiento térmico para limitar las pérdidas. Por otro lado, cuando se suministra calor a un cuerpo y este se incorpora en forma de calor latente, la energía aportada induce un cambio de fase o una reacción química en el medio, pero la temperatura de este permanece constante. La fusión del hielo de agua o la hidrogenación del magnesio aportan ejemplos de este tipo de proceso. El inconveniente de estos almacenes reside en que suelen resultar más difíciles de manejar y controlar.

Un buen material para el almacenamiento térmico es el agua, debido a su elevada capacidad calorífica (4,2 julios por gramo y grado Kelvin, frente a los 0,9 del hormigón o los 2,1 de un aceite térmico típico). Ello implica que, con cambios de temperatura modestos, pueden almacenarse cantidades considerables de energía. Cabe citar el ejemplo del Parlamento Federal alemán, cuyo sistema de calefacción aprovecha el calor sobrante de una central térmica, transportado por conductos de agua emplazados a 300 metros de profundidad. La urbanización muniquesa de Ackermannbogen cuenta con un depósito de agua de 5700 metros cúbicos que suministra calor a unos 300 hogares y que, durante el verano, se calienta gracias a 2900 metros cuadrados de paneles solares. También en viviendas unifamiliares podría aplicarse este principio: un aljibe de agua bien aislado y de unos 150 metros cúbicos bastaría para satisfacer las necesidades de una casa construida de acuerdo con los estándares modernos de aprovechamiento energético.

Un método alternativo lo proporciona la hidrogenación y deshidrogenación de zeolitas, silicatos porosos que, entre otras aplicaciones, se emplean en los intercambiadores iónicos, en los procesos de desecación y como catalizadores. Estos materiales se deshidratan a temperaturas elevadas, las cuales pueden alcanzarse con paneles solares. Si, más tarde, entran en contacto con aire húmedo, vuelven a absorber agua y liberan calor. Su capacidad de almacenamiento asciende a unos 0,3 kilovatios hora por kilogramo. Para calentar una vivienda se necesitarían unos 20 metros cúbicos de zeolita. Dado que se trata de un sistema de almacenamiento que opera con calor latente —y, por tanto, a temperatura constante—, podría prescindirse de los costosos sistemas de aislamiento térmico.

Las grandes instalaciones de almacenamiento térmico, con una capacidad de varios gigavatios hora, han hecho posible que las centrales solares contribuyan a la carga base de la red (la cantidad mínima de energía que las compañías deben suministrar). En la central granadina de Andasol, que opera con espejos cilindroparabólicos, la luz solar se focaliza para calentar 28.500 toneladas de sal fundida (una mezcla de nitrato sódico y potásico) a unos 400 grados Celsius. Durante la noche, la sal se deja enfriar hasta los 300 grados; el calor liberado en el proceso se usa para vaporizar agua y propulsar turbinas generadoras de electricidad. La cantidad de energía térmica almacenada en la sal fundida asciende al gigavatio hora. En torno al 37 por ciento de dicha cifra puede transformarse en electricidad.

En principio, las instalaciones termosolares podrían emplear también almacenes de calor latente. Una posibilidad adecuada para operar a temperaturas de entre 300 y 500 grados Celsius (las alcanzadas en las centrales cilindroparabólicas) nos la proporciona la hidrogenación y deshidrogenación de magnesio, un proceso investigado hace ya varios años por nuestro grupo del Instituto Max Planck para la Investigación del Carbón. Al reaccionar con el hidrógeno, el magnesio libera calor. Por su parte, el hidruro correspondiente se disocia en magnesio e hidrógeno a temperaturas de entre 300 y 500 grados Celsius (la temperatura exacta depende de la presión del hidrógeno).

Esa reacción permite almacenar 0,9 kilovatios hora por kilogramo de magnesio. Para alcanzar una capacidad térmica equiparable a la de la central de Andasol bastarían, en lugar de

28.500 toneladas de sal fundida, unas 1100 toneladas de magnesio, lo que implicaría un coste cinco veces menor. Sin embargo, se necesitaría infraestructura adicional para el hidrógeno. Ello podría lograrse incorporando a la central otra instalación solar que, por medio de un proceso termoquímico, proporcionase directamente el hidrógeno.

ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO

Los dispositivos electroquímicos pertenecen a los sistemas de almacenamiento más conocidos. Las baterías de iones de litio son hoy comunes en teléfonos móviles, ordenadores portátiles e incluso vehículos eléctricos, y cabe esperar que su presencia continúe aumentando durante los próximos diez años. Una gran ventaja de estos dispositivos reside en su alta eficiencia: en función de las corrientes de carga y descarga (las corrientes pequeñas resultan muy eficientes, pero conllevan largos períodos de carga) puede recuperarse más de un 90 por ciento de la energía almacenada.

Una batería típica de iones de litio posee un ánodo de grafito, entre cuyas capas se almacena el litio, y un cátodo de óxido de cobalto. El primero desprende iones de litio que, dotados de carga positiva, circulan por el líquido de la batería hasta el cátodo. El electrón liberado permanece en el ánodo, por lo que, si este se conecta al cátodo mediante un circuito externo, se creará una corriente eléctrica. Cuando los electrones que la componen llegan al cátodo, cada uno de ellos se incorpora a un ion de cobalto con cuatro cargas de signo positivo, el cual se combina después con el litio para formar óxido de litio y cobalto. Si se aplica un voltaje externo, este proceso se invierte y la batería se recarga. El voltaje de estos dispositivos asciende a 3,6 voltios.

Una batería de iones de litio almacena 0,2 kilovatios hora por kilogramo, la mayor densidad energética de todas las baterías recargables. En el caso de las células interconectadas empleadas en los coches eléctricos la densidad de almacenamiento resulta algo más baja. Estos vehículos consumen unos 0,15 kilovatios hora por kilómetro, por lo que, para obtener una autonomía de 500 kilómetros (el límite inferior para un motor de combustión con el depósito lleno), se necesitaría una batería de media tonelada incluyendo los componentes necesarios. La única manera de reducir este peso de manera apreciable implicaría aumentar la densidad energética de las baterías, algo que por el momento no parece posible. Más de la mitad de la masa de la batería reside en el cátodo, el cual se compone de óxidos de metales de transición u otras sustancias de peso elevado. No se prevé que aparezcan materiales mucho más ligeros que puedan desempeñar esa función. Por otro lado, las pilas de metal y aire poseen densidades de almacenamiento mayores, pero no pueden recargarse. En la actualidad se está investigan-

SOLAR MILLENIUM AG



El complejo termosolar de Andasol, en Granada, almacena el calor generado durante las horas de luz en depósitos de sal fundida (*marrón*). Durante la noche, esta se emplea para generar energía eléctrica.



Los vehículos eléctricos podrían servir a modo de almacenes móviles de la red y contribuir así a amortiguar los picos en la generación de electricidad.

GENERAL MOTORS

do de manera intensiva la posibilidad de recargar estas y otras pilas, como las de litio y azufre. Es cuestionable que tales sistemas lleguen a resultar prácticos; en su caso, aún harán falta años de investigación, si no décadas.

Aunque los vehículos eléctricos tienen sus limitaciones, ofrecen nuevas posibilidades no solo como reemplazo de los coches de combustión, sino también como almacenes móviles descentralizados de la red eléctrica. En Alemania hay unos 42 millones de vehículos que, durante la mayor parte del día, permanecen aparcados. Si cada uno dispusiese de una batería eléctrica con una capacidad de 75 kilovatios hora, en conjunto sumarían 3150 gigavatios hora, unas 80 veces más que todas las centrales de hidrobombeo del país. Por supuesto, no toda esa capacidad podría emplearse como almacén energético de la red, puesto que la función primordial de un automóvil es servir al transporte. Dado que tampoco se conoce a ciencia cierta hasta qué punto los ciclos reiterados de carga y descarga disminuyen la vida útil de las baterías, estas solo se cargarían durante los excedentes de producción, pero no se conectarían a la red en los momentos de déficit. Con todo, un buen número de vehículos eléctricos podría contribuir de manera significativa a suavizar los picos de producción y a estabilizar así la red de suministro.

También las grandes baterías estacionarias deberían ayudar a estabilizar la red. Las de iones de litio resultan aún demasiado caras, pero actualmente se trabaja en el desarrollo de técnicas más asequibles. Los sistemas de almacenamiento con una capacidad de varios cientos de megavatios hora podrían ayudar a superar las temporadas de calma en los parques eólicos, así como las épocas de mal tiempo en las instalaciones fotovoltaicas. En Japón y EE.UU. ya se usan baterías de sodio y azufre, así como baterías de flujo redox. En las primeras, el sodio y el azufre reaccionan para formar sulfuro de sodio. Para ello ambas sustancias deben estar fundidas, por lo que el dispositivo necesita operar a entre 300 y 350 grados Celsius. Mantener dicha temperatura requiere un aporte continuo de energía, razón por la que no resultan adecuadas para el almacenaje de larga duración.

Las baterías de flujo redox se basan en procesos de oxidación-reducción en soluciones de electrolitos. Las más conocidas son las de zinc y bromo, así como las de vanadio, ambas disponibles en el mercado. Esta última cuenta con dos depósitos con soluciones de electrolitos: uno contiene iones de vanadio con dos cargas positivas (V^{2+}); el otro, con cinco cargas positivas (V^{5+}). Para obtener energía eléctrica, en un electrodo se oxida el V^{2+} a V^{3+}, mientras que en el otro el V^{5+} se reduce a V^{4+}, de manera que se crea una diferencia de potencial entre los electrodos. En el proceso de carga de la batería, tiene lugar la reacción inversa. La superficie de los electrodos determina la potencia, mientras que la capacidad de almacenamiento depende del tamaño de los depósitos. Estos dispositivos se muestran relativamente robustos, si bien presentan una densidad de almacenamiento muy baja, del orden de decenas de vatios hora por kilogramo.

En conjunto, las baterías forman parte de las técnicas de almacenaje más investigadas y con un abanico de aplicaciones más amplio. Cabe esperar progresos notables en este campo durante los próximos años, tanto en lo que se refiere al rendimiento como al coste de estos dispositivos.

DEL HIDRÓGENO A LA GASOLINA

En sentido estricto, por «almacén químico» entendemos un compuesto cuyas moléculas encierran grandes cantidades de energía en sus enlaces. Dada su gran estabilidad, tales sustancias se muestran especialmente indicadas para almacenar energía durante largos períodos de tiempo, lo que abre las puertas a la posibilidad de emplearlos como depósitos estacionales. En estos momentos se investigan, sobre todo, cinco sustancias: hidrógeno, metano, metanol, etanol y mezclas de hidrocarburos líquidos, entre los que se encuentran la gasolina y el diésel.

El hidrógeno es considerado un vector (portador) energético muy prometedor, ya que presenta una densidad de almacenamiento enorme (33,3 kilovatios hora por kilogramo), no es tóxico y, como residuo de la combustión, deja agua pura. No obstante, adolece de inconvenientes: debido a su carácter gaseoso, incluso a altas presiones muestra una densidad energética moderada con relación a su volumen; además, no se obtiene como tal de la naturaleza, sino que debe generarse por medios artificiales, como la electrólisis (la descomposición del agua por medio de una corriente eléctrica). De momento, el ciclo completo de transformación de energía eléctrica en hidrógeno y este de nuevo en electricidad muestra unas pérdidas de hasta el 70 por ciento. Por otro lado, los sistemas de electrólisis resultan caros, por lo que aprovechar de esta manera los excedentes de producción acarrearía costes elevados.

El hidrógeno puede también obtenerse mediante otros procesos, si bien estos se encuentran aún en estado de desarrollo. En principio, las instalaciones solares de torre central podrían alcanzar temperaturas lo bastante elevadas como para descomponer el óxido de zinc en sus elementos constituyentes. Después, el zinc reaccionaría con agua para formar óxido de zinc e hidrógeno, con lo que se habría generado un ciclo cerrado de reacciones. También se están investigando algas que producen hidrógeno en su metabolismo, si bien las aplicaciones técnicas de estos procesos se muestran inciertas. También la descompo-

sición directa del agua por fotocatálisis se encuentra aún en la etapa de investigación básica.

Lo que sí parece viable es el almacenamiento de hidrógeno en grandes cantidades; por ejemplo, en almacenes subterráneos de alta presión. La cueva de Clemens Dome, en Texas, que forma parte de una unión de refinerías, cuenta con una capacidad de 580.000 metros cúbicos y puede almacenar hidrógeno a una presión de hasta 100 bares. En teoría, las pérdidas por fugas apenas llegan al 0,01 por ciento al año, por lo que la energía interna del depósito asciende a unos 170 millones de kilovatios hora, a partir de los cuales se podrían obtener 85 millones de kilovatios hora de energía eléctrica. Por el momento no existen ni las turbinas de gas para el funcionamiento con hidrógeno puro ni las células de combustible para su operación a gran escala, pero tales sistemas parecen factibles.

Más difíciles de llevar a la práctica resultan los depósitos de hidrógeno para automóviles. En su caso, estos podrían constituir, junto con las pilas de combustible, una alternativa a los motores de combustión. Los almacenes a 700 bares de presión ofrecen las mejores perspectivas, pero su densidad de almacenamiento se muestra aún insuficiente.

El metano, el componente principal del gas natural, presenta una densidad de almacenamiento por unidad de masa menor que la del hidrógeno. Sin embargo, en estado gaseoso su densidad por unidad de volumen resulta tres veces mayor. Además, la infraestructura no plantearía problemas, pues ya existen grandes redes de distribución de gas natural, así como almacenes subterráneos. El metano puede obtenerse a partir de la reacción del hidrógeno con el monóxido o el dióxido de carbono. Su eficiencia energética resulta menor que la del hidrógeno, pero sus defensores argumentan que parte de las emisiones de dióxido de carbono actuales podrían tratarse con hidrógeno obtenido de manera regenerativa para producir metano, metanol o hidrocarburos líquidos. Sin embargo, cada uno de estos procesos muestra un balance de dióxido de carbono negativo, ya que el hidrógeno necesario siempre podría emplearse para generar energía eléctrica, sin las emisiones derivadas de la quema de los combustibles mencionados.

Más atractiva se muestra la conversión de biomasa en gas con contenido en metano, si bien ello requiere asegurarse de que el metano no escapa de las instalaciones de biogás, ya que su efecto invernadero resulta 25 veces mayor que el del dióxido de carbono. Con turbinas de gas y vapor, el metano puede transformarse en electricidad con una eficiencia energética de hasta el 60 por ciento, con posibilidades para aprovechar el calor emitido en el proceso. También las pilas de combustible con electrolito sólido permiten obtener energía eléctrica a partir del metano; hoy por hoy, sin embargo, la eficiencia de estos dispositivos resulta inferior a la de las turbinas.

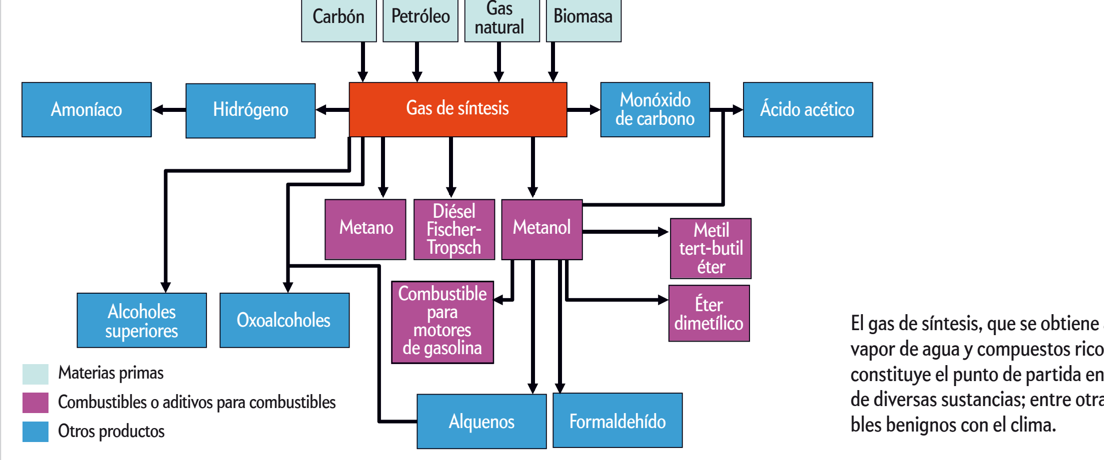
El metanol posee también cualidades prometedoras como almacén energético. Se trata de un líquido fácil de manejar y que puede producirse sin grandes complicaciones a partir de gas de síntesis. Este, a su vez, se obtiene a partir de combustibles fósiles o biomasa. El metanol puede usarse tanto en motores de combustión como en centrales eléctricas, si bien presenta ciertas desventajas con respecto a otros almacenes químicos. En primer lugar, para producirlo se requiere hidrógeno, el cual siempre podría emplearse como medio de almacenaje más eficiente. Por otro lado, casi no existe infraestructura para su distribución y aprovechamiento. En tercer lugar, su densidad de almacenamiento se muestra considerablemente menor que la de otros vectores energéticos líquidos, como los hidrocarburos

GAS DE SÍNTESIS

El «chico para todo» de la química del carbono

El gas de síntesis consta de una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Se produce cuando el vapor de agua reacciona a altas temperaturas con compuestos químicos ricos en carbono, como carbón, petróleo, gas natural o biomasa. La proporción de hidrógeno depende de la sustancia empleada: con gas natural, la mezcla resultante contiene tres veces más hidrógeno que monóxido de carbono; con carbón, ambos compuestos se obtienen a partes iguales.

El gas de síntesis permite elaborar sustancias diversas, como metano (con ayuda de catalizadores de níquel), metanol (con catalizadores de cobre y óxido de zinc) o hidrocarburos superiores (con catalizadores de cobalto y hierro, en un proceso de Fischer-Tropsch). Con metanol pueden obtenerse alquenos, útiles en la fabricación de plásticos. El gas de síntesis sirve también como punto de partida para elaborar compuestos de elevado contenido energético, aptos para el almacenaje químico de larga duración.



El gas de síntesis, que se obtiene a partir de vapor de agua y compuestos ricos en carbono, constituye el punto de partida en la elaboración de diversas sustancias; entre otras, combustibles benignos con el clima.

FERDI SCHÜTH/*SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

que pueden obtenerse a partir de gas de síntesis. Por último, es venenoso.

El primer alcohol superior, el etanol, ya se emplea a gran escala como almacén químico de energía. Se obtiene con facilidad a partir de la fermentación de biomasa, si bien la plantación de cultivos para la fabricación de etanol compite con la producción alimentaria, una circunstancia que ha originado crudos conflictos por la explotación de la tierra [*véase* «Energía y producción alimentaria», por Duncan Graham-Rowe; Investigación y Ciencia, agosto de 2012]. Otro tanto cabe decir del biodiésel obtenido mediante transesterificación o hidrogenación de aceites vegetales.

El etanol goza de una densidad energética un 30 por ciento mayor que la del metanol; además, puede agregarse sin problemas a la gasolina para motores de combustión. Para poder emplearlo en centrales eléctricas, sin embargo, estas deberían remodelar su infraestructura, por lo que probablemente acaben imponiéndose otras alternativas. Con todo, si el bioetanol pudiera obtenerse de manera sostenible y sin detrimento de la producción alimentaria, adquiriría un claro interés como combustible para el transporte.

Por último, existe la opción de conservar la infraestructura actual para gasolina y diésel, y producir estos hidrocarburos a partir de fuentes renovables. Gracias al proceso de Fischer-Tropsch, descubierto hace 90 años en el instituto Max Planck para la Investigación del Carbón, puede obtenerse diésel de alta calidad a partir de gas de síntesis. Existen otros métodos que también permiten generar mezclas de hidrocarburos similares a la gasolina a partir de gas de síntesis, pasando por la producción intermedia de metanol. Si el gas de síntesis procede de biomasa, los combustibles resultantes serían benignos para el clima, ya que el carbono que emitirían habría sido retirado previamente de la atmósfera durante la fotosíntesis de los cultivos de origen. Además, la técnica aprovecharía la parte leñosa (no comestible) de las plantas, por lo que no competiría con la industria alimentaria. El contenido energético de la biomasa que puede transformarse en combustible mediante la producción previa de gas de síntesis asciende a un 40 por ciento. Ya existen algunas plantas piloto en funcionamiento, como la del Instituto de Tecnología de Karlsruhe o la de la empresa Choren, de Friburgo.

Cabe esperar que los hidrocarburos líquidos continúen desempeñando un papel central debido a su elevada densidad energética. El tráfico aéreo y el de camiones pesados dependen de ellos. Para los próximos decenios aún hay suficientes materias primas fósiles, pero en un futuro más lejano los hidrocarburos generados a partir de biomasa irán ganando terreno. Las primeras pruebas de producción regenerativa de este tipo de combustibles ya se han llevado a cabo con éxito, tanto en la aviación militar como en la civil.

UN MEDIO PARA CADA FIN

El suministro energético del futuro dependerá de varias técnicas de generación, por lo que igualmente variados deberán ser nuestros sistemas de almacenamiento. Parece probable que el sector del automóvil se decante por los hidrocarburos líquidos y las baterías eléctricas. Que las pilas de combustible de hidrógeno acaben imponiéndose a las anteriores dependerá de la eficiencia y coste del proceso de obtención del hidrógeno.

Los almacenes térmicos, en combinación con las centrales termosolares, podrían equilibrar las fluctuaciones de poca duración de la generación eólica y fotovoltaica. También las centrales hidroeléctricas reversibles, los depósitos de aire comprimido y las grandes baterías estacionarias se acomodan bien a tal fin: pueden mantener sus reservas de energía durante el plazo de varios días o incluso semanas, con una capacidad del orden del megavatio o el gigavatio hora.

En lo que se refiere al almacenamiento estacional de energía, por el momento solo cabe considerar, aparte de grandes embalses, los almacenes químicos. Hoy por hoy, el hidrógeno y el metano se erigen como los candidatos más prometedores. El metano puede obtenerse de manera eficiente a partir de biomasa, siempre que esta no se necesite para la producción de combustible líquido. Puede que el etanol cobre protagonismo en algunas zonas. Si resultase viable descomponer la lignocelulosa a bajo coste y aprovechar así la parte leñosa de las plantas, el metano y el etanol podrían obtenerse en grandes cantidades [*véase* «Biocombustibles de segunda generación», por Katharine Sanderson; Investigación y Ciencia, agosto de 2012]. Algunos ámbitos, como el tráfico aéreo y el de vehículos pesados, seguirán necesitando hidrocarburos semejantes a la gasolina o el diésel. El proceso Fischer-Tropsch permite obtenerlos de manera regenerativa a partir de biomasa.

Los sistemas de calefacción seguirán su propio curso. En las construcciones nuevas el problema será cada vez menor, puesto que las continuas mejoras en el aislamiento térmico de los edificios harán que cada vez se requiera menos energía para calentarlos. En un futuro, la regulación de temperatura de los espacios interiores posiblemente se beneficie mucho más que hasta ahora de los almacenes térmicos que «repostan» durante el verano. Las bombas de calor o los calefactores eléctricos podrían cubrir picos de demanda ocasionales.

En general, podemos concluir que cualquier modelo energético futuro basado en fuentes renovables producirá, sobre todo, corriente eléctrica. Dado que en todo proceso de transformación se sufren pérdidas, la electricidad generada deberá usarse directamente en la mayor medida posible. Para ello harán falta redes de transporte eficientes que, en un caso ideal, abarquen extensiones continentales [*véase* «Por una red eléctrica intercontinental», entrevista a Gregor Czisch; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. Cuanto mayor sea la superficie cubierta por la red de transporte, con mayor facilidad podrán equilibrarse los déficits de una zona con los excedentes de otra sin necesidad de recurrir al almacenaje energético.

Con una mezcla de técnicas, redes de transporte y sistemas de almacenamiento bien coordinados, deberíamos poder abastecernos de electricidad incluso sin combustibles fósiles. En todo caso, la energía será más cara que hoy: al quemar carbón, petróleo y gas natural, estamos recuperando parte de la energía que el sol ha estado depositando sobre la biomasa del planeta durante millones de años. Una vez consumida esta herencia, el esfuerzo para obtener energía aumentará y, con ello, el precio que habremos de pagar.

PARA SABER MÁS

Chemische und physikalische lösungen für die speicherung von wasserstoff. U. Eberle et al. en *Angewandte Chemie*, vol. 121, págs. 6732-6757, 2009.

Hydrolysis of cellulose as the entry point into biorefinery schemes. R. Rinaldi y F. Schüth en *ChemSusChem*, vol. 2, págs. 1096-1107, 2009.

Chemical compounds for energy storage. F. Schüth en *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 83, págs. 1984-1993, 2011.

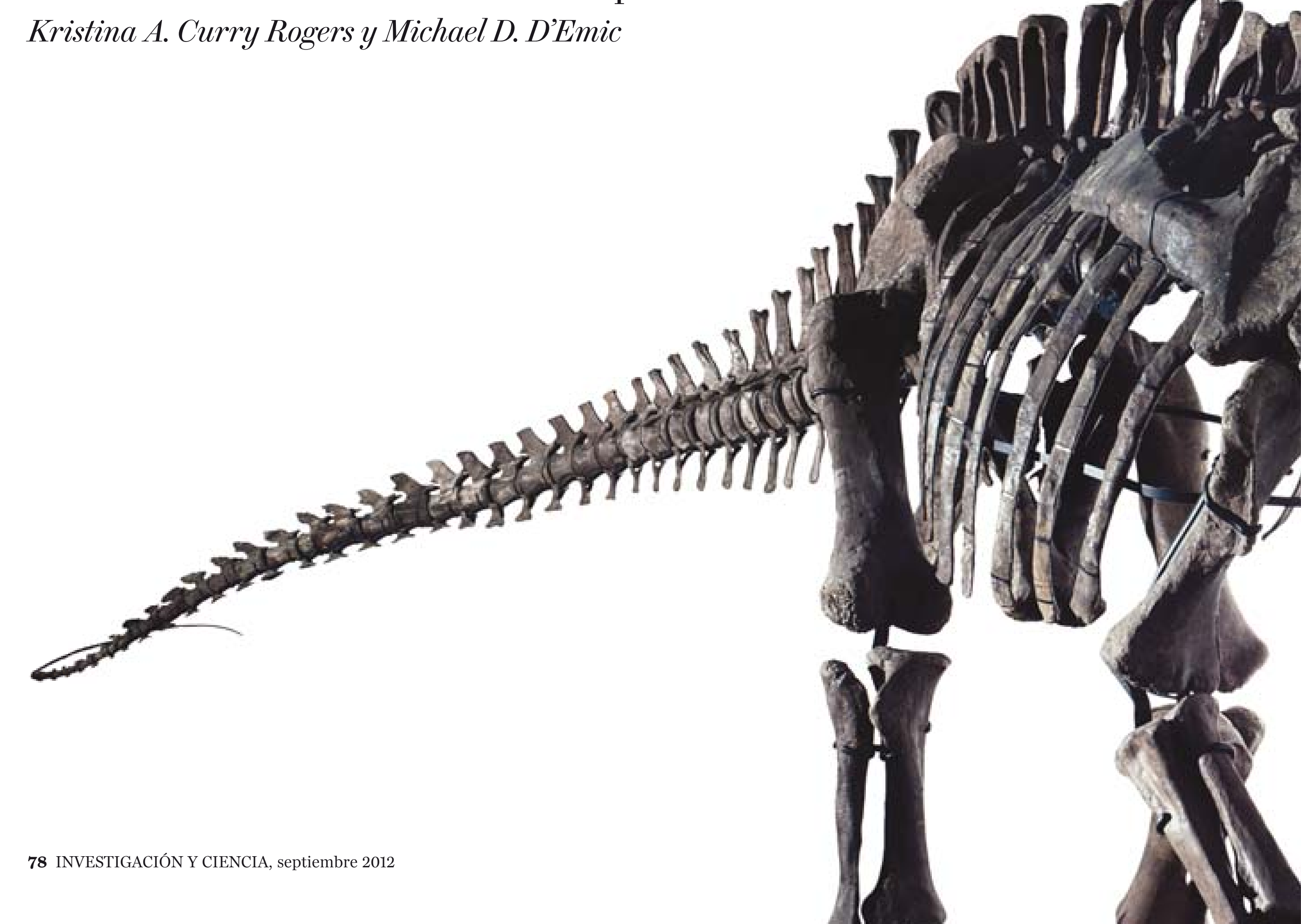
Atrapar el viento. Davide Castelvecchi en *Investigación y Ciencia*, n.º 427, abril de 2012.

EVOLUCIÓN

El triunfo de los

Los saurópodos, los dinosaurios de cuello largo antaño considerados iconos de la extinción, prosperaron durante millones de años en todo el planeta

Kristina A. Curry Rogers y Michael D. D'Emic



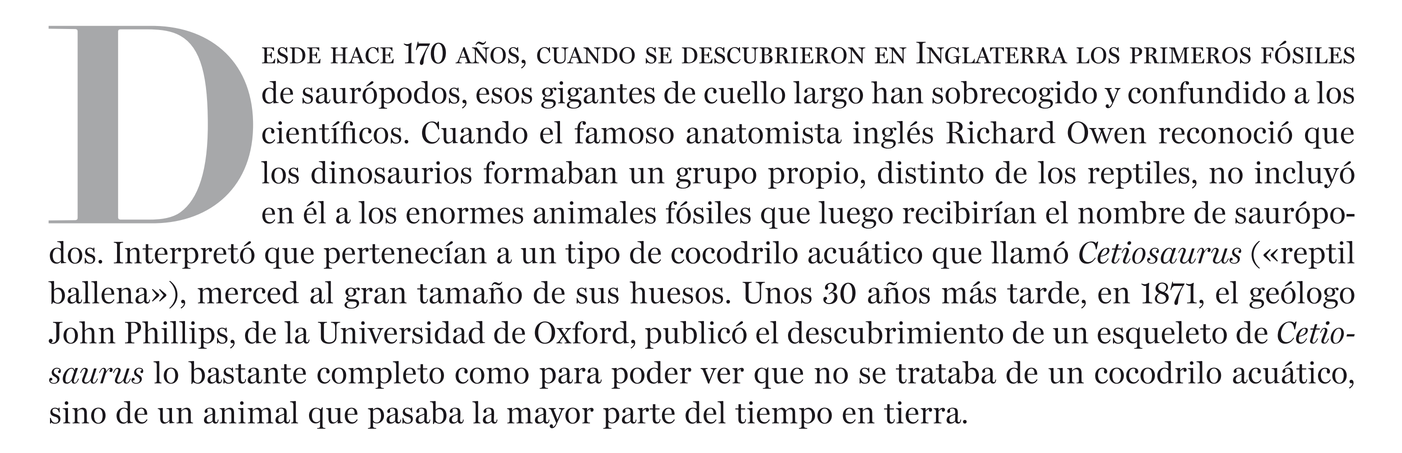


titanes

APATOSAURUS, **conocido antiguamente como *Brontosaurus*, exhibe la anatomía clásica de los saurópodos: presenta una columna vertebral larga que disminuye de tamaño hacia ambos extremos, un cerebro de pequeñas dimensiones y cuatro extremidades con forma de columna. Durante su largo reinado, los saurópodos evolucionaron y adquirieron diferentes tamaños corporales y diversas morfologías de dientes y caras, pero su arquitectura básica se mantuvo.**

Kristina A. Curry Rogers es paleontóloga de vertebrados en el Colegio universitario Macalester. Sus estudios se centran en la evolución y paleobiología de los saurópodos. Ha viajado por todo el mundo, desde Argentina hasta Zimbabue, en busca de fósiles de dinosaurios.

Michael D. D'Emic es paleontólogo de vertebrados en la Universidad del Sur de Georgia. Ha realizado excavaciones en busca de saurópodos del Cretácico inferior en Montana y Wyoming. Está particularmente interesado en los titanosaurios, uno de los grupos de saurópodos.



Desde hace 170 años, cuando se descubrieron en Inglaterra los primeros fósiles de saurópodos, esos gigantes de cuello largo han sobrecogido y confundido a los científicos. Cuando el famoso anatomista inglés Richard Owen reconoció que los dinosaurios formaban un grupo propio, distinto de los reptiles, no incluyó en él a los enormes animales fósiles que luego recibirían el nombre de saurópodos. Interpretó que pertenecían a un tipo de cocodrilo acuático que llamó *Cetiosaurus* («reptil ballena»), merced al gran tamaño de sus huesos. Unos 30 años más tarde, en 1871, el geólogo John Phillips, de la Universidad de Oxford, publicó el descubrimiento de un esqueleto de *Cetiosaurus* lo bastante completo como para poder ver que no se trataba de un cocodrilo acuático, sino de un animal que pasaba la mayor parte del tiempo en tierra.

Durante decenios, la afirmación de Phillips causó consternación entre los paleontólogos. No se entendía que un animal tan gigantesco pudiera soportar su peso en tierra. Debido a que los saurópodos eran percibidos como unos animales sin un nicho ecológico claro, mal adaptados para vivir en tierra o en el agua, se les veía como herbívoros arcaicos, poco flexibles y de un tamaño excesivo, condenados a la extinción o, al menos, a ser marginados por otros dinosaurios más avanzados. Todavía en 1991 se afirmaba que los saurópodos tendrían escaso éxito entre los dinosaurios y que solo subsistieron en ausencia de otros dinosaurios herbívoros más especializados. Desde ese punto de vista, esos gigantes del Jurásico (hace entre 200 y 145 millones de años) habrían cedido el testigo en el Cretácico (hace entre 145 y 65,5 millones de años) a herbívoros mejor adaptados y de mayor tamaño cerebral, como los hadrosaurios de «pico de pato» y los ceratópsidos con cuernos. Ambos grupos habrían competido con los saurópodos y los habrían llevado a su extinción.

Siguiendo con esa idea, solo un pequeño grupo de saurópodos que había quedado relegado al hemisferio sur habría sobrevivido hasta el final del Cretácico, momento en que el impacto de un asteroide produjo el final de la era de los dinosaurios.

Pero tal imagen de los saurópodos como animales mal adaptados, lentos y condenados a desaparecer se hallaba también destinada a extinguirse. Recientes descubrimientos de saurópodos en distintos lugares del mundo, hasta 60 nuevas especies en los últimos diez años, han demostrado que el grupo poseía una extraordinaria resistencia y prosperó durante millones de años, llevando al límite el tamaño que un animal terrestre puede alcanzar. Gracias a estos hallazgos y al empleo de nuevas técnicas analíticas, se están empezando a responder cuestiones sobre la forma en que los saurópodos se reproducían, crecían, se alimentaban y se adaptaban a los drásticos cambios ambientales. Los nuevos datos han modificado por completo el conocimiento tradicional acerca de ese icónico grupo de dinosaurios.

MÁS ALLÁ DE LOS SAURÓPODOS CLÁSICOS

Como la mayoría de la gente, nuestro primer encuentro con estos dinosaurios de cuello largo fue en medio de la algarabía de las visitas escolares a los museos de historia natural. Por encima del barullo de los visitantes se alzaba un majestuoso saurópodo. Más largo que dos autobuses escolares, su cuello y su cráneo se extendían por encima del público y de otros dinosaurios. Incluso bajo el guardapolvo, esos fósiles inspiraban respeto. La mayoría de los saurópodos clásicos, como *Diplodocus*, *Camarasaurus* y *Apatosaurus*, fueron descubiertos a finales del siglo XIX; a principios del siglo XX, todos los museos más importantes del mundo contaban con algún esqueleto. Fueron tantos los fósiles de saurópodos del Jurásico que entraron en los museos que todavía hoy es posible hallar, en las entrañas de sus almacenes, fósiles envueltos en fundas de escayola que aguardan a ser abiertos y estudiados.

EN SÍNTESIS

La idea tradicional de los paleontólogos sobre los saurópodos, unos dinosaurios gigantes de cuello largo y cerebro pequeño, era la de unos animales condenados a la extinción y mal adaptados a vivir en tierra o en el agua.

Hallazgos recientes han cambiado esa interpretación y han demostrado que los saurópodos prosperaron durante 150 millones de años.

El secreto de su éxito parece residir en la mezcla de sus características, algunas similares a las de mamíferos y otras a las de reptiles, además de su capacidad para adaptarse a un planeta cambiante.

FOTOGRAFÍAS OBTENIDAS EN EL MUSEO CARNEGIE DE HISTORIA NATURAL POR CHRISTOPHER GRIFFITH (*páginas anteriores*)

Pero los saurópodos clásicos representan solo una pequeña parte de la diversidad total del grupo. La historia sobre su origen, y el modo en que dieron lugar a tantas formas durante los 150 millones de años de su trayectoria evolutiva, empieza mucho antes de su propia aparición. Hace 210 millones de años, a finales del Triásico, se produjo un evento de extinción mundial que afectó a otros grupos de reptiles y abrió el camino para que los dinosaurios dominasen los ecosistemas terrestres.

Los dinosaurios más antiguos del registro fósil eran pequeños animales bípedos de los que se han hallado restos de hace 230 millones de años en el hemisferio sur. Esas especies evolucionarían para dar lugar a dos grupos de dinosaurios más conocidos, los saurópodos y los terópodos (como *Tyrannosaurus rex*). Se han descubierto huellas características de los saurópodos, con postura cuadrúpeda y patas elefantinas, en yacimientos de Norteamérica y Argentina que datan de hace 225 millones de años. Los fósiles de sus enormes esqueletos son solo algo posteriores; están representados por *Isanosaurus* en Tailandia, *Gongxianosaurus* en China y *Vulcanodon* en Zimbabue. Las primeras especies ya presentaban los rasgos distintivos de los saurópodos: una columna vertebral adaptada para caminar de forma cuadrúpeda (muchas especies de saurópodos tenían más de 100 vértebras), cuellos y colas muy largos que se adelgazaban hacia los extremos, cráneos diminutos y extremidades con forma de columna para poder soportar su gran peso. Los saurópodos mantendrían esa arquitectura corporal durante toda su historia evolutiva, lo que les convertiría en uno de los grupos más reconocibles entre todos los dinosaurios.

Pero los saurópodos no se estancaron. Su anatomía se perfeccionó a lo largo del tiempo mientras los movimientos de las placas tectónicas contribuían a la aparición de diferentes linajes. La diversidad de los saurópodos aumentó y disminuyó durante la historia evolutiva del grupo, desde su origen hasta el final de la era de los dinosaurios. Los repetidos picos en su diversidad contradicen la idea tradicional de que los saurópodos solo prosperaron durante el Jurásico y se redujeron al mínimo en el Cretácico. En lugar de ello, observamos que algunos grupos importantes de saurópodos, como los robustos titanosaurios y los rebaquiosaurios de «cara de pala», sobrevivieron mucho más allá de su supuesto apogeo jurásico. Incluso a finales del Cretácico, en el crepúsculo de la era de los dinosaurios, los saurópodos eran diversos y numerosos.

Incluso en el crepúsculo de la era de los dinosaurios, los saurópodos eran diversos y numerosos

TAMAÑO Y CRECIMIENTO

Los nuevos descubrimientos demuestran el éxito de los saurópodos en cuanto a la distribución geográfica, la diversidad y la longevidad de sus linajes. Pero ¿qué estrategias tenían para sobrevivir? La respuesta parece residir en que se beneficiaban de una mezcla singular de rasgos de reptiles y mamíferos que, al combinarse, dieron lugar a unos organismos únicos. Aunque *Sir* Owen se equivocaba al considerarlos lagartos, su definición de ellos como «reptiles ballena» resulta bastante apropiada después de todo.

Como el resto de los dinosaurios y la mayoría de los reptiles, los saurópodos eran ovíparos. La prueba más directa de su comportamiento reproductivo procede de unos depósitos de 80 millones de años de antigüedad en Auca Mahuevo (Argentina). En 1997, Luis Chiappe, del Museo de Historia Natural de los Ángeles, y su equipo hallaron un campo de nidos que contenía miles de huevos. Dentro de algunos de ellos, los investigadores descubrieron embriones de saurópodos, varios de los cuales conservaban la piel y las membranas del huevo fosilizadas.

Los restos de los nidos permiten afirmar que los titanosaurios hacían puestas de entre 20 y 40 huevos esféricos, de entre 13 y 15 centímetros de diámetro, en depresiones excavadas en el suelo. La abundancia de nidos en los niveles de Auca Mahuevo indica que los animales formaban grandes grupos y anidaron en esta área al menos en seis ocasiones. Sin embargo, no tenemos pruebas de si incubaban los huevos o bien cuidaban a las crías cuando estas rompían el cascarón. De hecho, la proximidad entre las estructuras de anidamiento hace pensar que los progenitores cuidaban poco a sus crías. En el caso de otros grandes vertebrados, como los elefantes y las ballenas, los progenitores invierten mucha energía en el cuidado de muy pocas crías. En cambio, los saurópodos presentarían un comportamiento más similar al de los reptiles, que producen numerosas crías pero que deben espabilarse por sí solas.

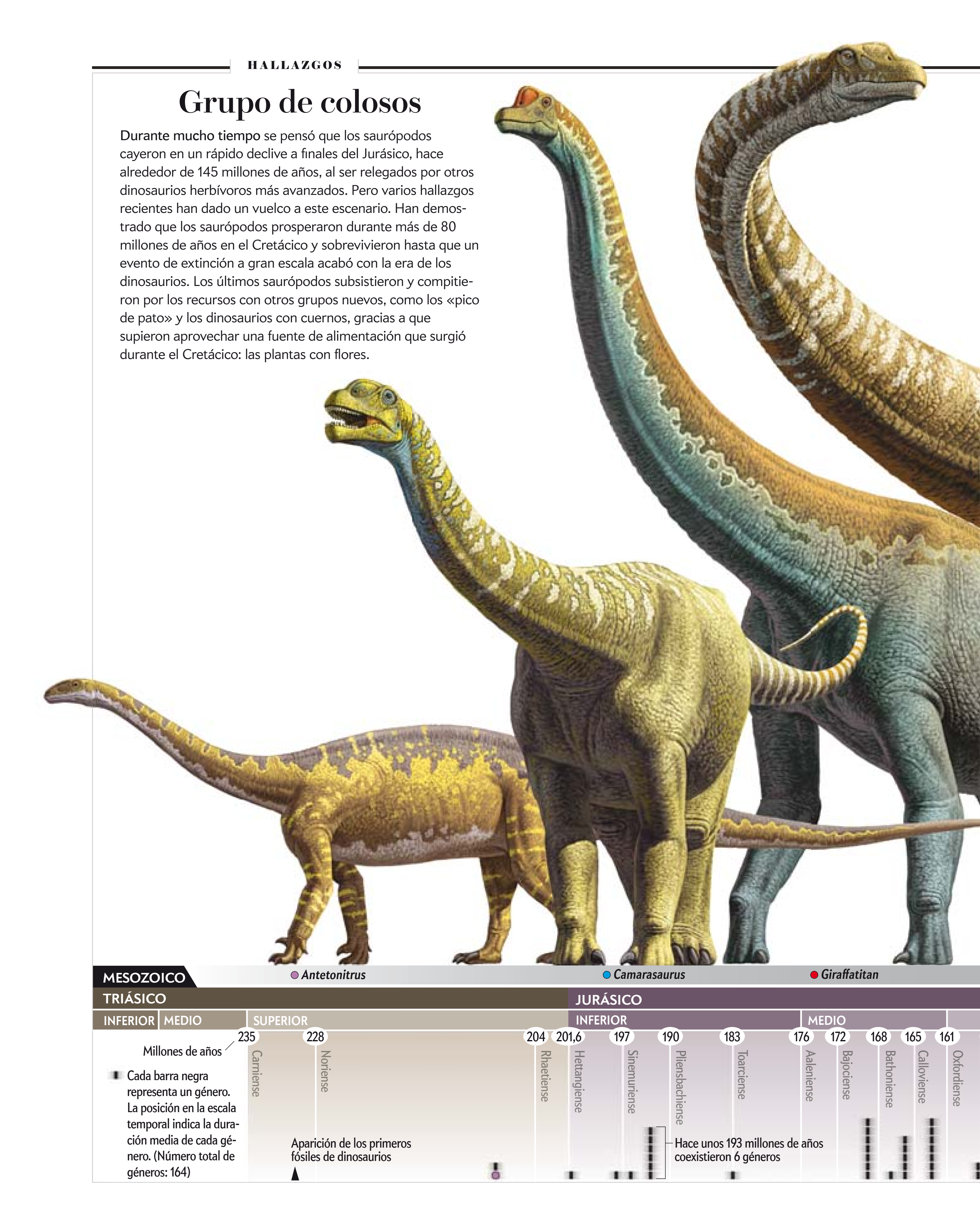
Aunque el cuidado paternal de los saurópodos se asemejaba al de los reptiles, no sucedía lo mismo con el ritmo de crecimiento. Desde el nacimiento hasta la edad adulta, los saurópodos debían crecer más deprisa que cualquier otro animal que haya existido nunca. Las crías medían menos de medio metro al nacer y pesaban menos de 10 kilos. En las especies más grandes, los adultos alcanzaban una longitud de unos 30 metros y una masa de entre 25 y 40 toneladas, e incluso más. En comparación, un elefante recién nacido pesa unos 130 kilos y, cuando llega a la edad adulta, entre 2268 y 6350 kilos. Para estimar el tiempo de desarrollo de los saurópodos, la mayoría de los paleontólogos realizaba extrapolaciones a partir del ritmo de crecimiento de los reptiles actuales. Según este modelo, incluso los saurópodos más pequeños habrían tardado más de 60 años en llegar a la madurez y más de un siglo en alcanzar el tamaño de adulto. Ello significaría tener que esperar al menos 60 años para reproducirse. Poseer un tamaño reducido durante tanto tiempo y ser presa de depredadores en un período tan prolongado representa un riesgo excesivo para cualquier animal.

En los años sesenta del siglo XX surgió una perspectiva diferente sobre el crecimiento de los saurópodos. Armand de Ricqlés, del Colegio de Francia en París, empezó a estudiar la histología, o microestructura interna, de los huesos para conocer la historia de la vida de los dinosaurios y de otros animales extintos. En los fósiles se conserva la estructura mineral del hueso, la densidad y disposición de las cavidades que dejan atrás los vasos sanguíneos y el grado de remodelación ósea. Tales rasgos señalan que los saurópodos presentaban un ritmo de crecimiento muy elevado durante la mayor parte de su vida, más rápido que el de los reptiles pero semejante al de los grandes mamíferos, muchos de los cuales maduran en pocos decenios. De esta forma, los saurópodos no necesitarían vivir durante siglos para alcanzar sus gigantescas dimensiones.

Con tal crecimiento y tamaño corporal adulto, la voracidad de los saurópodos debía de ser impresionante. De hecho, uno

Grupo de colosos

Durante mucho tiempo se pensó que los saurópodos cayeron en un rápido declive a finales del Jurásico, hace alrededor de 145 millones de años, al ser relegados por otros dinosaurios herbívoros más avanzados. Pero varios hallazgos recientes han dado un vuelco a este escenario. Han demostrado que los saurópodos prosperaron durante más de 80 millones de años en el Cretácico y sobrevivieron hasta que un evento de extinción a gran escala acabó con la era de los dinosaurios. Los últimos saurópodos subsistieron y compitieron por los recursos con otros grupos nuevos, como los «pico de pato» y los dinosaurios con cuernos, gracias a que supieron aprovechar una fuente de alimentación que surgió durante el Cretácico: las plantas con flores.



Tácticas de supervivencia

Los saurópodos se beneficiaron de una serie de adaptaciones para vivir en tierra que les permitieron alcanzar tamaños que no han sido superados por ningún animal terrestre.

Al contrario que los reptiles, los saurópodos crecían con rapidez, de forma similar a como lo hacen los animales terrestres actuales, como los elefantes, y alcanzaban el tamaño adulto en pocas décadas.

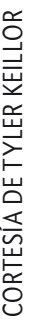
Unas vértebras ahuecadas habrían aligerado el peso del esqueleto de los saurópodos. También permitían que el aire de los pulmones se expandiese por los sacos aéreos, lo que aumentaba la asimilación del oxígeno durante la respiración.

Los osteodermos, unas placas óseas que estaban integradas en la piel de algunos saurópodos, les habrían servido como una reserva de minerales que utilizarían en períodos de escasez. A medida que el animal envejecía, los osteodermos se ahuecaban para proporcionar calcio a la sangre.

FUENTES: DANIELA SCHWARZ-WINGS, MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE BERLÍN (*detalle de la vértebra*); KRISTIAN A. CURRY ROGERS Y MICHAEL D. D'EMIC (*curvas de crecimiento*); SOCIEDAD GEOLÓGICA DE AMÉRICA (*escala geológica*); RAÚL MARTÍN (*ilustración*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)



Tentempié de saurópodo. **Los saurópodos eran invulnerables cuando alcanzaban el tamaño adulto, pero las crías constituían presas fáciles para depredadores grandes y pequeños. En 2010, Jeffrey Wilson, de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores describieron un grupo de huevos de saurópodo hallado en la India junto a un fósil de serpiente de tres metros de longitud. El reptil había rodeado uno de los huevos y lo había roto. Al lado había una cría diminuta de saurópodo emergiendo del cascarón (*arriba*). En el yacimiento hay otros ejemplos similares, lo que indica que las serpientes debían de frecuentar los campos de anidamiento de los saurópodos para darse un festín a base de huevos y crías.**



CORTESÍA DE TYLER KEILLOR

de los grandes misterios de la biología de los saurópodos es cómo obtenían tal cantidad de plantas para sobrevivir y crecer durante tanto tiempo. Los estudios tradicionales sobre la alimentación de los saurópodos se centraban en la morfología dental, en las marcas microscópicas de desgaste, en la reconstrucción de los músculos de la mandíbula y en análisis biomecánicos sobre los movimientos de la mandíbula. Esas investigaciones demostraron que los saurópodos empleaban distintos métodos para alimentarse. Algunos consumían la vegetación más dura, mientras que otros ingerían plantas más blandas.

Los científicos concuerdan en que los saurópodos no masticaban durante largo tiempo, por lo que necesitarían de algún mecanismo interno para procesar las plantas y extraer sus nutrientes. Como solución a ello se ha propuesto que los animales se valían de gastrolitos, o piedras en el estómago. En las formaciones geológicas de Norteamérica que contienen saurópodos se han hallado con frecuencia piedras redondeadas. Durante mucho tiempo se pensaba que esas piedras pulidas eran análogas a los gastrolitos que ingieren algunos vertebrados, como ciertas aves, para ayudarlo a triturar y digerir el alimento. Para comprobar tal hipótesis, Oliver Wings, del Museo de Historia Natural de Berlín, y Martin Sander, de la Universidad de Bonn, realizaron en 2007 un análisis experimental sobre la forma en que las piedras de la molleja de las aves actuales se degradaban. Su estudio demostró que los supuestos gastrolitos de saurópodo carecían de la textura superficial típica de los gastrolitos de las aves. De hecho, no se han descubierto pruebas contundentes de gastrolitos en el interior de los esqueletos de los saurópodos. Por ese motivo, concluyeron que los saurópodos no empleaban gastrolitos, sino que extraían los nutrientes de las plantas gracias a la fermentación microbiana en sus largos aparatos digestivos, de forma similar a como lo hacen hoy los grandes herbívoros como los rinocerontes.

Otros datos sobre la estrategia alimentaria de los saurópodos se han obtenido a partir del estudio de una de sus características más distintivas: el largo cuello. Según la interpretación tradicional, los animales utilizaban el cuello para alimentarse de las partes más altas de los árboles, allí donde las hojas resultaban inalcanzables para otros dinosaurios. Pero un nuevo estudio ha hecho cambiar tal idea. John Whitlock, de la Universidad de la Columbia Británica, ha reconstruido la estrategia alimentaria en los diplodócidos, un grupo de saurópodos que incluye a los conocidos *Apatosaurus* y *Diplodocus* y que vivió desde el Jurásico superior hasta el Cretácico superior. Las diferencias en la forma del morro y en los dientes indican que algunos saurópodos estaban especializados en consumir cierto tipo de plantas, mientras que otros eran más generalistas; que unos comían plantas del suelo y otros se alimentaban de los árboles. Diferentes equipos han llegado a conclusiones similares tras estudiar la anatomía del cuello, ya que la alimentación de los saurópodos se hallaba limitada por la flexibilidad de las vértebras. Dependiendo de la capacidad de movimiento del cuello hacia arriba o hacia abajo, los animales prendían un tipo de planta u otra. Esa diversidad en la dieta ayuda a entender el modo en que diferentes gigantes compartían el mismo ecosistema.

Las adaptaciones de los saurópodos a diversas dietas aumentaron durante el Cretácico al tiempo que se extendían las plantas con flores. Una hipótesis antigua proponía que otros dinosaurios herbívoros mejor adaptados a alimentarse de esas plantas relegaron a los saurópodos, que se convertirían así en una línea evolutiva secundaria durante el Cretácico. Según esa idea, los saurópodos, con dientes pequeños, cráneos diminutos y cuerpos enormes, no pudieron competir con los dinosaurios más eficientes, como los «pico de pato» o los dinosaurios con cuernos. Estos dos grupos disponían de numerosas hileras de dientes agrupadas que formaban unas baterías de trituración formidables.

Pero hoy sabemos que el Cretácico constituyó el intervalo con mayor diversidad dentro de la evolución de los saurópodos y quizás uno de los más interesantes. Lejos de quedar marginados por las nuevas especies, los saurópodos diversificaron sus formas y funciones, al tiempo que desarrollaron nuevas estrategias para explotar una amplia variedad de plantas. Tómese como ejemplo *Nigersaurus*, una especie de 115 millones de años de antigüedad descubierta en Níger a mediados de los años noventa del siglo xx por el equipo de Paul Sereno, de la Universidad de Chicago. El animal estaba dotado de amplias baterías de dientes con un ritmo de reemplazamiento muy rápido, lo que le proporcionaba una dentición afilada para cortar con eficacia la vegetación. En cada una de las posiciones dentales, los dientes se sustituían con una periodicidad mensual, un ritmo que supone el doble de lo observado en los dinosaurios «pico de pato» o en los dinosaurios con cuernos. La orientación de los canales semicirculares del oído interno (el órgano del equilibrio) de *Nigersaurus* indica que solía sostener la cabeza con el morro apuntando hacia el suelo, con una rotación de unos 70 grados respecto a la posición de la cabeza en otros saurópodos. Tal orientación hace pensar que el animal estaría especializado en alimentarse de plantas que crecían en el suelo.

A medida que el Cretácico avanzaba y las plantas con flores se diversificaban, los saurópodos también disponían de más recursos alimentarios. El análisis microscópico de los coprolitos (heces fosilizadas) de los titanosaurios ha permitido recuperar los fitolitos (la estructura silícea de algunas plantas) y documentar al menos cinco tipos de herbáceas, además de otras plantas con flores, como magnolias, coníferas y palmeras. El descubrimiento, publicado en 2005 por Vandana Prasad, del Instituto Birbal Sahni de Paleobotánica (India), situó la aparición y diversificación de las herbáceas modernas 30 millones años antes de lo que se pensaba y reforzó la idea de que los saurópodos se alimentaban de ellas. Como cabía esperar de un vertebrado herbívoro de crecimiento rápido, los saurópodos no eran melindrosos a la hora de comer. Lejos de quedar marginados en los nuevos ecosistemas, habrían aprovechado al máximo los nuevos recursos y habrían ingerido todo lo que podían desde la copa de los árboles hasta el pasto bajo sus pies.

Una mayor capacidad de asimilar el oxígeno habría favorecido, asimismo, el crecimiento de los saurópodos. Las aves actuales presentan vértebras dotadas de sacos aéreos que están conectados con los pulmones y les permiten aprovechar mejor el oxígeno que los mamíferos. Los sacos proporcionan un flujo de aire unidireccional que incrementa la cantidad del oxígeno extraído durante la respiración. (En los mamíferos, el flujo de aire es bidireccional: cada vez que inspiramos, se mezcla en los pulmones el aire nuevo con el antiguo, lo que disminuye la eficacia de extracción de oxígeno.) Las vértebras de los saurópodos se parecen a las de las aves modernas, poseen cavidades internas casi idénticas y un sistema complejo de oquedades delimitadas por arcos óseos. Las vértebras más neumatizadas (con más ahuecamientos) son las del cuello y el tronco, pero en algunos saurópodos se extienden hasta la pelvis y la cola. El primer efecto de esta neumatización es la reducción del peso de la columna vertebral, lo que conllevaría, según algunos cálculos, una disminución importante del peso corporal. En el colosal *Sauroposeidon*, hallado en América del Norte, el cuello estaba compuesto de un 75 por ciento de aire. También es posible que, igual que en las aves, las vértebras neumatizadas de los saurópodos alojasen un amplio sistema de sacos aéreos que aumentase el flujo de aire de los pulmones y mejorase la eficacia respiratoria. Ello les habría permitido mantener una alta tasa metabólica y una gran actividad, en consonancia con su rápido crecimiento y enorme tamaño corporal.

HACER FRENTE A LAS ADVERSIDADES

Poseer un gran tamaño suponía una ventaja para los saurópodos, como también sucede en los animales grandes de hoy. Muchas especies de saurópodos eran, en la mitad de su crecimiento, más voluminosas que un elefante adulto, el cual casi no tiene depredadores (con la excepción de los humanos). Una vez que alcanzaban el tamaño adulto, los saurópodos, como *Allosaurus*, carecerían de depredadores. Como contrapartida, el gran tamaño corporal los hacía vulnerables a la escasez de agua o alimentos. Pero algunos desarrollaron soluciones ante ese problema: unas cuantas especies de titanosaurios tenían unas placas de hueso en la piel, los osteodermos. Algunos animales actuales los presentan y forman las corazas de protección de cocodrilos, lagartos y armadillos. En varios dinosaurios, los osteodermos constituían placas de hueso o espinas óseas, como en *Stegosaurus*. Pero en los saurópodos no se ha podido determinar el lugar del cuerpo que ocupaban, por lo que resulta difícil conocer su función.

Los nuevos hallazgos podrían resolver ese enigma. En tiempo reciente hemos descrito dos osteodermos hallados en Madagascar junto a un esqueleto juvenil y a uno adulto de un titanosaurio, *Rapetosaurus*. El individuo adulto presentaba el osteodermo más grande que se ha encontrado hasta la fecha: 57 centímetros de longitud, 27 centímetros de grosor y un volumen cercano a los 10 litros. Las tomografías computerizadas y los muestreos indican que los osteodermos de *Rapetosaurus* se iban ahuecando a medida que el animal crecía. En los adultos, unos cinco litros de hueso interno se habrían sustituido por algún tejido blando. Al contrario que algunos animales actuales, que tienen una cubierta continua de osteodermos, *Rapetosaurus* (y quizás otros titanosaurios) solo poseía unas pocas placas de hueso grandes.

La morfología de los osteodermos de *Rapetosaurus* nos ha permitido descartar algunas de las ideas sobre la función de los osteodermos en los titanosaurios. Los elementos ahuecados ofrecerían una escasa protección, ya que las mandíbulas de los depredadores los romperían con facilidad. De igual forma, su reducida superficie en relación con el volumen y su dispersa distribución en piel los convertía en elementos poco útiles para la termorregulación. En lugar de ello, pensamos que los osteodermos de los titanosauros servían como valiosas reservas de minerales que les ayudarían a sostener el ritmo de crecimiento y la capacidad de oviposición incluso en épocas de penuria, de modo semejante a como lo hacen en algunos animales actuales. En todos los vertebrados, incluidos los humanos, los minerales de los huesos se sacrifican para mantener el nivel de calcio en la sangre. Esta reabsorción aumenta en ciertos períodos, cuando los recursos escasean, durante la puesta de huevos y en edades avanzadas (lo que genera la osteoporosis en los humanos). Los osteodermos cuentan con una red de vasos sanguíneos que sirven para que las células transporten los minerales liberados del interior de los huesos. La hipótesis explica a la perfección el caso del enorme saurópodo que habitó en Madagascar en el Cretácico superior. Debido a los frecuentes e intensos períodos de sequía de aquella época, la vida en la isla era dura, lo que empujó a algunos dinosaurios carnívoros, como *Majungasaurus*, al canibalismo y a provocar la extinción de numerosas especies de anfibios, aves y saurópodos. Los osteodermos habrían ayudado a sobrevivir a algunos saurópodos en Madagascar y, en otros lugares, a superar las alteraciones ambientales y las frecuentes sequías.

Los saurópodos parecen haber puesto a prueba las leyes biológicas sobre el ritmo de crecimiento y tamaño máximos que se pueden alcanzar. Tales adaptaciones les habrían podido llevar a la extinción, pero a medida que sabemos más sobre el registro fósil parece haber sucedido todo lo contrario. Aunque acabaran por extinguirse, poco antes de que se produjese la catástrofe de la que no podían escapar, los saurópodos habían prosperado durante 150 millones de años y se habían convertido en unos de los animales más extravagantes que ha producido la evolución.

PARA SABER MÁS

The sauropods: Evolution and paleobiology. Kristina A. Curry Rogers y Jeffrey A. Wilson. University of California Press, 2005.

Inferences of diplodocoid (Sauropoda: Dinosauria) feeding behavior from snout shape and microwear analyses. John A. Whitlock en *PLoS ONE*, vol. 6, n.º 4, 6 de abril de 2011.

Sauropod dinosaur osteoderms from the late Cretaceous of Madagascar. Kristina Curry Rogers et al. en *Nature Communications*, vol. 2, n.º 564. Publicado en línea el 29 de noviembre de 2011.

por Norbert Treitz



Norbert Treitz es profesor emérito de didáctica de la física en la Universidad de Duisburg-Essen.

Progresiones geométricas y pseudounidades

Las escalas logarítmicas permiten manejar con comodidad todos los órdenes de magnitud. En ocasiones, sin embargo, las pseudounidades que se derivan de ellas confunden más a los profanos de lo que ayudan a los expertos

El fisiólogo Ernst Heinrich Weber descubrió en 1834 que nuestra capacidad de percepción no depende de diferencias absolutas, sino relativas: una persona puede distinguir dos estímulos R y $R + dR$ cuando el cociente dR/R (y no la diferencia dR) sobrepasa cierto valor mínimo. Dicho umbral varía según el sentido del que se trate, pero para una misma sensación perceptiva permanece constante en un amplio intervalo: 0,003 para la frecuencia del sonido; 0,016 para la intensidad lumínica; 0,019 para el peso; 0,088 para la densidad de energía sonora, etcétera. Este resultado se conoce como ley de Weber.

Más tarde, Gustav Theodor Fechner postuló que la magnitud de la sensación sería proporcional al logaritmo de la intensidad del estímulo. Ello explicaría la ley de Weber, siempre que se presuponga que podemos distinguir entre dos sensaciones cuando la diferencia de sus magnitudes sobrepasa cierto umbral. La ley de Weber-Fechner proporciona una justificación —si bien insuficiente— para la existencia de escalas logarítmicas en acústica, electrotecnia, fotografía y astronomía. En principio, nada tenemos que objetar contra las escalas logarítmicas, pues a menudo muestran una gran utilidad. Sin embargo, no podemos decir lo mismo sobre las pseudounidades correspondientes.

Son numerosas las magnitudes que toman valores a lo largo de varias potencias de diez. Si las representásemos en una escala lineal, o bien el papel no alcanzaría para los valores más elevados, o bien los menores se tornarían tan diminutos que desaparecerían en las cercanías del cero. Es aquí donde la escala logarítmica exhibe todas sus virtudes: si en lugar de los valores en sí se representan sus exponentes, podremos reflejar todo lo que la naturaleza tiene que ofrecernos, desde las partículas elementales hasta los cúmulos de galaxias. Solo hemos de evitar el error de confundir el valor logarítmico con el verdadero.

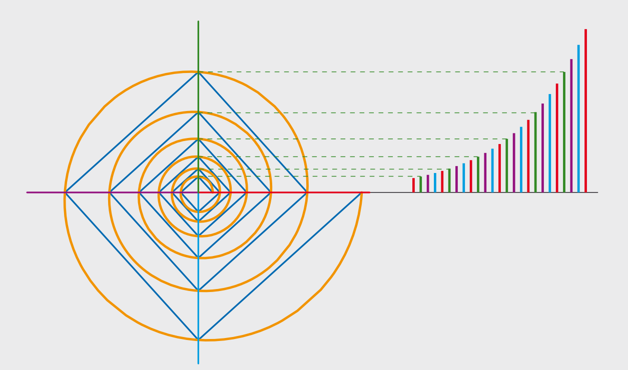
Lo que ha aportado la escala logarítmica a la representación gráfica equivale a la labor de la progresión geométrica en favor de la materialización de cantidades que varían en grandes intervalos. El ejemplo más corriente lo llevamos todos nosotros en el bolsillo: monedas y billetes. Sus importes se escalonan en tres cantidades

EL TEOREMA DE LA ALTURA Y LA PROGRESIÓN GEOMÉTRICA

La altura *h* relativa a la hipotenusa de un triángulo rectángulo divide a esta en dos segmentos p y q que satisfacen la relación $p/h = h/q$, lo cual se deduce de la semejanza entre los triángulos resultantes. Además, constituye un bonito método gráfico para obtener la «media geométrica» h a partir de p y q. La media aritmética, $(p + q)/2$, aparece en este caso como el radio del círculo de Tales.

Un triángulo rectángulo permite obtener, mediante rotaciones y ampliaciones sucesivas, una progresión de triángulos semejantes (*figura*). Se trata también de una progresión geométrica en el sentido usual, ya que el cociente de dos hipotenusas consecutivas (la razón de la progresión geométrica) permanece constante.

Permitiendo que en una progresión geométrica b^n el índice n tome valores en toda la recta real, llegamos a la función exponencial $y = b^x$ y a su inversa, $x = \log_b(y)$. Para la razón b, el número 2 aparece como una opción muy natural, al tratarse del menor entero positivo (después de la unidad). Esta es la razón por la que los ordenadores lo emplean tanto. Otras potencias de 2, como 8 o 16, constituyen bases igualmente adecuadas que complacerían a nuestra capacidad de retención, pues reducirían el número de cifras necesarias para representar un número.



Por desgracia, la base de nuestro sistema numérico por excelencia, el decimal, no es una potencia de dos. Mickey Mouse o los personajes de los Simpson (salvo Dios), poseen solo cuatro dedos en cada mano, pulgar incluido. Por tanto, podrían inventar el sistema octal para contar. La base de los logaritmos neperianos, el número e, no es un número entero ni demasiado cómodo a estos efectos. Como regla general para el cálculo mental, puede resultar útil saber que $10^3 \approx e^7 \approx 2^{10}$.

CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ

por cada potencia de diez. Pero con buen criterio: no de manera equitativa, sino redondeados y, por tanto, adaptados al sistema decimal. Dos valores consecutivos de esta escala monetaria se diferencian entre sí no por el factor $\sqrt[3]{10}$, sino por los factores 2 (dos veces) y 2,5. De igual forma, las pesas de una balanza utilizan también los números 1, 2 y 5.

Pero preguntémonos, junto con el matemático francés del siglo XVII Claude Gaspard Bachet de Méziriac, cuál es el juego de pesas mínimo para una balanza de dos platillos, sin escala y con una sola marca para el equilibrio. Nuestro objetivo consiste en hallar un juego de pesas que nos permita medir todos los pesos «enteros» comprendidos entre 1 y n. Esto nos lleva de inmediato a considerar la progresión geométrica «binaria» dada por 1, 2, 4, 8, 16...

Si se colocan entonces las pesas una tras otra —comenzando por la mayor— y se escribe un 0 por cada pesa que vence al objeto que deseamos pesar, y un 1 por las que no lo hacen, habremos obtenido el número binario que mejor aproxima el peso del objeto. Un conversor analógico-digital opera, en principio, de manera similar. O a la inversa: a partir de la representación binaria puede deducirse qué pesos debemos colocar, con lo cual tendríamos un conversor digital-analógico.

Así, con seis pesas «binarias» comprendidas entre el 1 y el 32, podremos obtener todos los pesos entre el 0 y el 63. Y, con m pesas, todas las cantidades entre 1 y $2^m - 1$. Por tanto, para reproducir todos los pesos enteros entre 0 y n, el menor número de pesas no podrá ser inferior al logaritmo en base 2 de n.

Bombillas y resistencias

En una ferretería encontraremos a nuestra disposición bombillas de 15, 25, 40, 60, 75, 100, 150 y 200 vatios. Estas cantidades resultan mucho más razonables que los múltiplos de diez (10, 20, 30, ..., 190 y 200), pues es más necesario un escalón intermedio entre 10 y 30 vatios que entre 180 y 200. Si ignoramos las bombillas de 75 vatios —las menos corrientes—, cada una de las restantes hasta 150 supera a la anterior en un factor aproximadamente igual a 1,5 o 1,6. En comparación con la longitud del intervalo considerado (de 15 a 150), esas cinco cantidades resultan muy similares. De hecho, se acercan bastante a la raíz quinta de diez: 1,5849. Vemos por tanto que, con algún redondeo, la potencia de las bombillas sigue una progresión geométrica de razón $10^{1/5}$. Sin embargo, la cifra que figura en una bombilla no es su lugar en dicha progresión, sino su potencia real. Algo muy razonable, pues nos evita toda complicación cuando deseamos combinar varias luces.

Las resistencias eléctricas, por su parte, se suministran escalonadas según la sexta, duodécima y vigésima cuarta raíz de 10 como base, dependiendo de la precisión requerida. De la serie E12 puede conseguirse cualquier valor que se desee con una tolerancia del 10 por ciento. Aquí también pueden leerse los valores reales con claridad, si bien el profano se preguntará por qué resulta tan sencillo encontrar una resistencia de 470 ohmios, pero no una de 500.

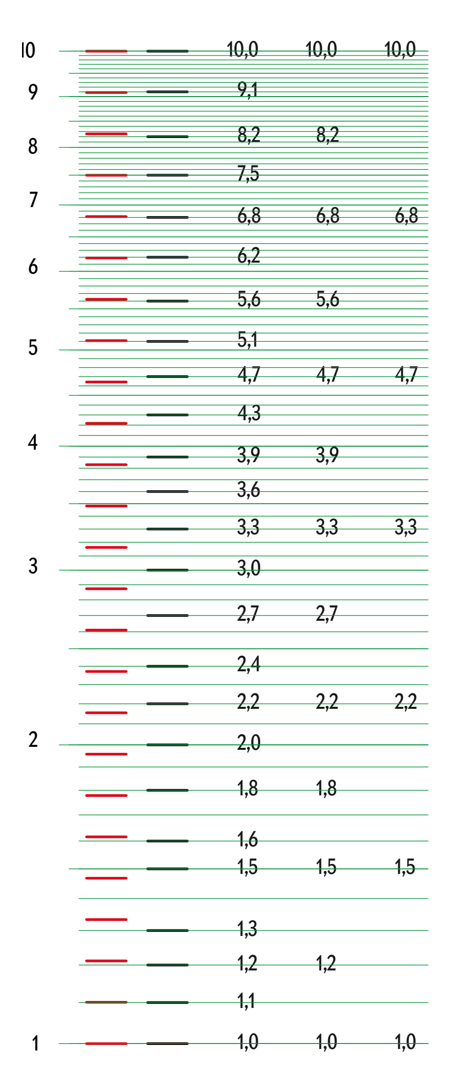
Un comerciante podría numerar las bombillas según el logaritmo de su potencia e incluir dicha escala en un catálogo. Sin embargo, carecería por completo de sentido que exigiese que los clientes se guiasen por esa cifra, en lugar de por la potencia real. Pero ¿en verdad obra alguien de esa manera? Lo cierto es que sí, como comprobaremos más adelante.

En música, el tiempo se fracciona en potencias de 1/2. Ello se debe a que, en general, nos resulta sencillo dividir algo por la mitad, tanto si es una salchicha como si se trata del tiempo. Que en solfeo las notas más breves se indiquen con más corchetes puede parecer carente de lógica; sin embargo, resulta muy práctico, pues durante las notas de mayor duración, visualmente menos llamativas, disponemos de más tiempo para explorar la partitura. Para indicar las particiones en tres o cinco unidades (tresillos y cinquillos) se insertan en el pentagrama las cifras adecuadas.

Normalizaciones curiosas

Georg Christoph Lichtenberg, físico y matemático alemán del siglo XVIII, escribió lo siguiente en el apartado «Todo tipo de artes» de su *Cuerno de Amaltea*: «Especificar un formato de papel, de tal manera que una cuartilla y una octavilla se asemejen una a otra». Las denominaciones tradicionales de cuartilla y octavilla ya dan a entender que el papel debía poder dividirse o plegarse en dos. Pero la exigencia de Lichtenberg, que va más allá de una similitud geométrica, nos conduce a la raíz cuadrada de 2 como proporción entre los lados. Con ello llegamos a la norma DIN 476 (ideada por Walter Porstmann en 1922), hoy conocida como ISO 216 y basada en el metro cuadrado: en concreto, una hoja de DIN An abarca una superficie de $(0,5)^n$ metros cuadrados. De esta manera, con el papel habitual de 80 gramos por metro cuadrado, pueden introducirse tres hojas DIN A4 en un sobre y enviarlo sin problemas, pues el conjunto no pasará de los 20 gramos: una hoja DIN A4 es la dieciseisava parte de un metro cuadrado, por lo que pesa 5 gramos.

La raíz cuadrada de 2 aparece incluso como medida de reducción o ampliación en las fotocopiadoras, algo que con toda



CHRISTOPH PÖPPE, SEGÚN NORBERT TREITZ

Resistencias: Los valores comerciales de las resistencias siguen aproximadamente una escala logarítmica. Las líneas rojas se corresponden con una escala perfecta (ficticia) en la que cada resistencia tomaría un valor $\sqrt[24]{10} \approx 1,10069$ veces mayor que la anterior. Los números muestran los valores normalizados y redondeados a un decimal de las series comerciales E24, E12 y E6.

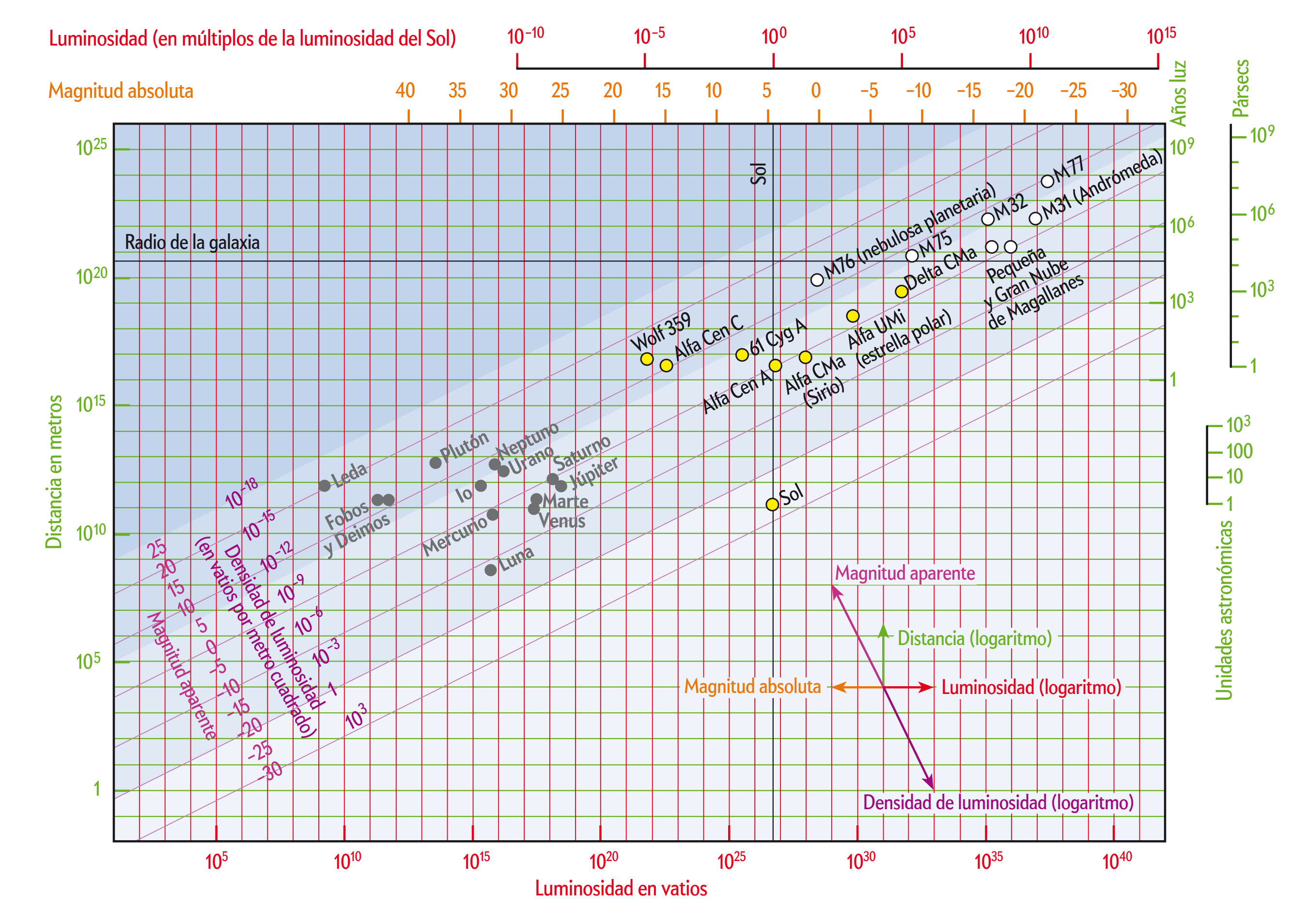
seguridad Lichtenberg nunca llegó a imaginar. En nuestros días ya no manejamos las denominaciones de origen latino basadas en potencias de dos, como cuartilla u octavilla, pero nos hemos familiarizado con el formato DIN (las siglas del Instituto Alemán de Normalización). Y también, al menos en parte, con las series B y C para los sobres. Dicho de otro modo, operamos de manera más o menos consciente con logaritmos de base 1/2.

En la fotografía clásica (no digital), cada tipo de película necesita una exposición determinada. Para conseguir una cierta densidad óptica, el tiempo de exposición necesario es, con amplios márgenes, inversamente proporcional a la superficie de abertura del diafragma. En vez de dicha superficie, en la cámara se muestra la proporción entre la distancia focal y el diámetro de diafragma (y no al contrario, lo cual sería mucho más razonable), conocida como «número *f*». Las películas de grano fino presentan una mejor resolución espacial que las de grano más grueso, pero menor sensibilidad, por lo que para fotografiar un mismo objeto se requiere un tiempo de exposición mayor.

En lo que respecta a la sensibilidad de la película, existe una regla sencilla: en la escala ASA (de la antigua Asociación Americana de Estándares, hoy ANSI), una película de 100 ASA necesita el doble de tiempo de exposición o una abertura del diafragma dos veces mayor que una película de 200 ASA. Esta escala resulta, por tanto, tan simple como la que empleamos en las bombillas o en las resistencias. Sin embargo, a los expertos en fotografía del Instituto Alemán de Normalización la regla debió parecerles demasiado fácil. ¿Para qué existe, si no, la ley de Weber-Fechner? Cada vez que se dobla la sensibilidad, la escala DIN añade tres unidades, lo cual se debe a que el logaritmo decimal de 2 es aproximadamente igual a 0,3. Y, por medio de un superíndice idéntico al símbolo de grado centígrado, se denota la décima parte. De esta manera, 18º DIN corresponde a 50 ASA, y 21º DIN, a 100 ASA. Por fortuna, los carretes reproducen ambas especificaciones, gracias a lo cual podemos ignorar sin más la escala DIN.

Objetos astronómicos

Con algunas simplificaciones, el brillo aparente de una estrella viene dado por la densidad de luminosidad que llega hasta nuestro planeta; es decir, la luminosidad del astro (energía por unidad de tiempo radiada en todas direcciones) dividida por 4π veces el cuadrado de su distancia a la Tierra. Desde la Antigüedad se distinguen unos cinco niveles, que en latín recibían el nombre de *magnitudines*. Estos resultan desacertados y nada intuitivos por tres razones: primero, la numeración decrece a medida que el brillo aumenta; segundo, se basan en la suposición de que todas las estrellas se encuentran a la misma distancia (como se pensaba en la An-



Objetos astronómicos: Los colores de fondo de esta escala doblemente logarítmica indican el grado de visibilidad del objeto, ya sea con el ojo desnudo o con un telescopio. Los puntos indican galaxias y cúmulos estelares (*blanco*), estrellas (*amarillo*) y planetas y satélites naturales (*gris*). Los valores de 1/2 y -2 de las pendientes asociadas a las variaciones de intensidad proceden de la ley de Lambert, o del inverso del cuadrado de la distancia: en última instancia, una de las consecuencias de vivir en un espacio de tres dimensiones.

tigüedad); por último, se da por sentado que magnitud y luminosidad guardan una relación unívoca. Aún hoy sigue llamándose *magnitud aparente* al logaritmo en base $1/100^{1/5}$ de la densidad de potencia que llega a la Tierra (normalizada de cierta manera). Sirio, la estrella más brillante del firmamento, tiene en esta escala una magnitud de –1,46.

Si conocemos la distancia a la que se encuentra una estrella, podemos calcular su luminosidad a partir de la luz que llega hasta nosotros. La *magnitud absoluta* de una estrella se corresponde con la que asignaríamos a dicho astro si se hallase a una distancia de 10 pársecs (la distancia desde la que el radio de la órbita terrestre subtendería un ángulo de una décima de segundo de arco). En los cálculos de este estilo, la distancia también entra en forma de logaritmo en base $1/100^{1/5}$. En particular, se define el *módulo de distancia* como la diferencia entre la magnitud aparente y la absoluta. A fin de diferenciar entre las estrellas de la secuencia principal («enanas»), las gigantes y las supergigantes, podríamos definir, con relativo acierto, el concepto de «clases de magnitud». En su lugar, sin embargo, suele emplearse el término —mucho menos apropiado— «clases de luminosidad».

En el fondo, ninguna de las astucias logarítmicas de la astronomía se basa en las técnicas de medición. Se deben a la tradición histórica y, en parte, a razones fisiológicas o perceptivas. Y si bien puede que para los astrónomos profesionales sean una carga llevadera, para aficionados y estudiantes, a quienes intentamos acercar nuestro maravilloso universo, no suponen más que un obstáculo del todo innecesario.

Hace unas décadas, los logaritmos desempeñaban un papel muy diferente: nacieron para agilizar los cálculos. Sin calculadora, sumar o restar números de seis cifras resulta bastante más sencillo que multiplicarlos. Para ayudar en esta tarea, el matemático escocés John Napier y el suizo Jost Bürgi inventaron, entre finales del siglo XVI y principios del XVII, el cálculo logarítmico. Así, en vez de multiplicar dos números, basta con sumar sus logaritmos. De manera similar, la división y el cálculo de potencias se sustituyen por operaciones más sencillas. Para ello, lo único que se necesita es una tabla que nos permita obtener el logaritmo de cualquier número, y viceversa. Hoy el procedimiento resulta tan superfluo como los relojes de precisión mecánicos del siglo XVIII; si bien merece, al igual que estos, nuestro máximo respeto.

EL SISTEMA TERNARIO BALANCEADO

Bachet de Méziriac propuso otra variante del problema de las pesas: determinar el juego de pesas mínimo, si estas pueden colocarse en ambos lados de la balanza.

Una pesa situada en el platillo opuesto (en el del objeto que deseamos pesar) actúa como una de valor negativo, por lo que disponemos de las cifras –1, 0 y +1, asociadas a colocar cada pesa en el platillo de la derecha, en el de la izquierda o fuera de la balanza. Por tanto, tenemos una graduación con tres escalones, más generosa que una de dos.

El sistema numérico que se deriva de lo anterior es uno ternario, pero no basado en el 0, el 1 y el 2, sino un sistema ternario antisimétrico (o balanceado), en el que el 0 figura en el medio de las otras dos cifras. Esto aporta la ventaja de que, al calcular, los acarreos de las sumas se igualan bastante rápido. En 1958 se desarrolló en la Unión Soviética una computadora «ternaria» basada en este sistema numérico.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Naipes, palomas y relojes

Cómo codificar información por medio de una secuencia de cartas

Imagine que asiste usted a un espectáculo de magia en el que el ilusionista realiza el siguiente truco:

«A continuación seleccionaremos al azar a cinco miembros del público. Cada uno deberá tomar un naipe de una baraja española de 48 cartas. ¡Escojan el que deseen, pero no me lo enseñen, por favor! Entreguen el naipe elegido a mi ayudante, quien procederá a mostrarme cuatro de ellos. ¡Muchas gracias! Veo la sota de copas, el nueve de oros, el caballo de espadas y el rey de espadas. Ahora, utilizaré todos mis poderes de concentración para adivinar la carta que permanece oculta... ¡Sí, se trata del tres de copas!»

¿Cómo es posible? Sabemos que el ilusionista no puede leer la mente del ayudante, por lo que tal vez este haya empleado alguna estratagema para notificar al mago el palo y el número de la carta. ¿Acaso comparten un lenguaje corporal que les permite comunicarse en secreto? Como veremos, no es necesario. Existe un método por el que el ayudante puede comunicar al ilusionista el quinto naipe a partir del orden en el que muestra los otros cuatro.

A primera vista, algo así parece imposible: dadas cuatro cartas, no existen más que 4! permutaciones, por lo que elegir un orden solo permitiría codificar 24 mensajes. Sin embargo, el naipe que permanece oculto podría ser uno cualquiera de entre los 44 que el mago no ha visto.

Por extraño que parezca, el ayudante dispone de un método para indicar a su maestro de qué naipe se trata. Con suficiente práctica, también usted podrá ejecutar este truco ideado por William Fitch, conocido como *Fitch el Mago*, profesor de matemáticas en la Universidad Tufts y en la de Connecticut durante la primera mitad del siglo xx.

El secreto del ilusionista

La clave estriba en percatarse de que el ayudante no solo puede escoger el orden en el que mostrará las cuatro cartas, sino también cuál de las cinco seleccionadas permanecerá oculta. Podemos verlo así: el ilusionista debe identificar un conjunto sin ordenar de cinco cartas (las cuatro que ve, más la que debe adivinar); es decir, una de entre $\binom{48}{5}$ combinaciones posibles:

$$\binom{48}{5} = \frac{48{\cdot}47{\cdot}46{\cdot}45{\cdot}44}{5!} = 1.712.304\,.$$

Para ello, dispone de la información que le proporciona el ayudante. Esta consiste en una secuencia ordenada de cuatro cartas tomadas al azar de una baraja de 48 naipes, por lo que el número de mensajes diferentes asciende a:

$$\binom{48}{4}{\cdot}4! = 48{\cdot}47{\cdot}46{\cdot}45 = 4.669.920\,.$$

Vemos que existen muchos más mensajes que respuestas, lo que garantiza que, en principio, resulta posible emparejar cada combinación de cinco naipes con una única secuencia de cuatro cartas. Pensemos en cada una de dichas ordenaciones como en un representante del conjunto de cinco naipes. Si tanto el ilusionista como el ayudante memorizasen todos los detalles del emparejamiento, bastaría con que el primero recordase qué combinación de cinco cartas se corresponde con la secuencia mostrada por el ayudante.

Pero que dicha estrategia sea posible no significa que resulte factible, ya que ambos deberían memorizar un emparejamiento que incluye, al menos, 1.712.304 pares ordenados de conjuntos sin ordenar de cinco cartas y secuencias de cuatro cartas. No obstante, existe un algoritmo muy sencillo que permitirá al mago deducir la carta oculta.

Palomas y relojes

Dado que hay cuatro palos en la baraja, el principio del palomar [*véase* «Se equivocó la paloma», por Gabriel Uzquiano; Investigación y Ciencia, julio de 2011] nos asegura que, de las cinco cartas elegidas por el público, al menos dos pertenecerán al mismo palo. En nuestro ejemplo, dichos naipes son la sota y el tres de copas. El ayudante ocultará uno de ellos y utilizará el otro para comunicar al ilusionista el palo de la carta sin destapar.

El siguiente paso consiste en decidir cuál de esas dos cartas mostrar y cuál ocultar. Como hay doce cartas de cada palo, podemos disponerlas en un orden cíclico idéntico al de las horas que marca la esfera de un reloj. En tal caso, dadas dos cartas cualesquiera, siempre podremos escoger una de tal manera que resulte posible llegar a la otra en no más de seis pasos en sentido horario. En el ejemplo de la sota y el tres de copas, si partimos de la primera, alcanzaremos la segunda en cinco pasos. (Si deseásemos llegar al tres de copas desde la sota de copas en el mismo sentido, necesitaríamos siete pasos.)

Una vez que el ayudante haya identificado cuál de las dos cartas del mismo palo le permite alcanzar la segunda en seis pasos o menos, ocultará la otra. En nuestro ejemplo, tapará el tres de copas y mostrará la sota de copas en primer lugar. Si las cartas hubiesen sido el rey y el seis de bastos (u otro par en el que desde cualquiera de los naipes se llega al segundo en exactamente seis pasos), el ayudante podría ocultar la que más le placiera.

En el ejemplo inicial, el ayudante ocultaba el tres de copas y colocaba la sota de copas en el primer lugar de la secuencia. Al verla, el ilusionista deduce que la carta oculta pertenece al palo de copas y que, además, puede llegarse a ella desde la sota en no más de seis pasos en el sentido que marcan las agujas del reloj.

Ahora el ayudante debe disponer las tres cartas restantes de manera que codifiquen un número del uno al seis. Para ello, dados tres naipes cualesquiera, ilusionista y ayudante establecen un orden «natural» entre ellos. Según este, tres cartas se suceden de acuerdo con el orden alfabético del palo de cada una de ellas (bastos, copas, espadas y oros) y, en caso



de haber más de una carta del mismo palo, según su número. Esta estrategia asigna a las cartas un orden natural, o intrínseco, en el que denotaremos por I, M y S el naipe inicial, el medio y el superior, respectivamente.

Ahora el ayudante cuenta con 3! posibilidades para mostrar las cartas I, M y S. Por tanto, cada ordenación posible puede asociarse con un número entre el uno y el seis de acuerdo con la siguiente tabla:

Ordenación	Número
(I, M, S)	1
(I, S, M)	2
(M, I, S)	3
(M, S, I)	4
(S, I, M)	5
(S, M, I)	6

La ilusión completa

La secuencia que el ayudante muestra al ilusionista es la sota de copas, el nueve de oros, el caballo de espadas y el rey de espadas. Esta ordenación transmite al ilusionista toda la información que necesita.

La primera carta indica que el naipe oculto pertenece al palo de copas y que, en el sentido de las agujas del reloj, puede llegarse a él en seis pasos o menos desde el número diez. De las tres cartas restantes, el nueve de oros ocupa el lugar superior en el orden natural (dado que su palo es el último de todos), el caballo de espadas ocupa el lugar inferior, y el rey de espadas, la posición intermedia. Estas tres cartas han sido presentadas en la secuencia (S, I, M), por lo que codifican el número cinco. Así pues, la carta oculta no puede ser sino el tres de copas.

El ilusionista podría repetir el truco cuantas veces quisiera a fin de convencer a los escépticos. Supongamos que el ayudante vuelve a tomar cinco cartas escogidas al azar y que en esta ocasión se trata del as de bastos, la sota de espadas, el siete de copas, el cuatro de oros y el seis de espadas. Bastan unos segundos para decidir qué naipe ocultar, así como el orden en el que deben mostrarse los restantes. En primer lugar el ayudante enseñará el seis de espadas, con lo cual informará al ilusionista sobre el palo al que pertenece el naipe oculto y sobre el punto de partida en el ciclo horario. Después mostrará el siete de copas, el cuatro de oros y, por último, el as de bastos. Estos naipes se suceden en el orden (M, S, I), de manera que codifican el número cuatro. La carta oculta ha de ser, por tanto, la sota de espadas.

¿Más difícil todavía?

Tal vez merezca la pena mencionar que la ilusión no resulta mucho más difícil si se realiza con una baraja francesa de 52 naipes. Dado que en ella solo hay cuatro palos, el primer paso es el mismo. La única diferencia radica en el segundo. Como cada palo contiene 13 cartas, el ciclo horario debe ampliarse para incluir 13 posiciones. Ahora, entre dos cartas cualesquiera, siempre puede trazarse una ruta de seis pasos o menos. El resto procede de manera similar al caso de la baraja española.

Aun así, debemos notar que es obligado comenzar con cinco cartas. ¿Qué ocurriría si el ilusionista pidiera a los miembros del público que seleccionaran solo cuatro naipes? ¿Bastaría entonces con mostrar tres de ellos para adivinar la carta oculta? En tal caso habría que codificar $\binom{48}{4}$ combinaciones de cuatro cartas elegidas de una baraja de 48 a partir de $\binom{48}{3}\cdot 3!$ secuencias posibles. Sin embargo, el hecho de que existan muchas más combinaciones de cuatro naipes (194.580) que secuencias ordenadas de tres de ellos (103.776) convierte al truco en irrealizable.

PARA SABER MÁS

Michael Kleber describe la historia de la ilusión en **The best card trick**, que apareció publicado en *Mathematical Intelligencer*, vol. 24, n.º 1, 2002.





FUTURE SCIENCE. CUTTING-EDGE ESSAYS FROM THE NEW GENERATION OF SCIENTISTS,

por Max Brockman. Oxford University Press; Oxford, 2011.

Retos de la ciencia

Nuevas generaciones están rompiendo barreras

La ciencia del futuro la están creando los investigadores jóvenes de hoy. Tal es el supuesto básico de esta gavilla de 18 ensayos sobre temas punteros de diversas disciplinas, de la neurociencia a la psicología evolutiva, de las comunidades vegetales a la oceanografía. Lo más incitante, las ideas que rompen con los modelos establecidos. Por citar un breve muestrario: de las posibilidades de vida en otras partes del sistema solar y del universo escribe Kevin P. Hand, quien parte de la cuestión de por qué mundos oceánicos (así Europa, la luna de Júpiter) son sitios proclives para la vida. Pese a las pruebas en sentido contrario, la Tierra no era un lugar idóneo para la aparición de la vida; Anthony Aguirre mantiene que lo infinito debe llevarse al dominio de la física contrastable; Daniela Kaufer y Darlene Francis analizan los efectos del estrés sobre la mente y el cuerpo; Jon Kleinberg enjuicia formas de extraer sentido de la astronómica masa de datos que se está creando.

Vale la pena hacer parada en el artículo de Felix Warneken, docente de psicología de la Universidad Harvard, sobre las raíces evolutivas del altruismo humano en bebés y chimpancés de Uganda. Se da por cierto que uno de los rasgos característicos del hombre es su tendencia a ayudar a los otros, compartiendo recursos o confortando a los que sufren. En el estado adulto, semejante desprendimiento parece operar de forma rutinaria, aun cuando nos reporte un gravamen. Se atribuyen a la cultura las prácticas altruistas, en cuanto derivadas de normas morales recibidas de nuestros progenitores, de la escuela o de la sociedad. Por lo mismo, se trataría de un fenómeno exclusivamente humano. Los animales, en cambio, no actuarían por altruismo, sino que se moverían por intereses propios: nadie les enseñaría el valor de la solidaridad. Comparando el comportamiento de los niños con el de los chimpancés podemos hallar respuestas a la pregunta de si el altruismo se funda en normas sociales adoptadas para mantener a raya nuestra naturaleza egoísta o es por el contrario una inclinación natural nuestra.

Persisten en la actualidad cinco especies de primates: orangutanes, gorilas, bonobos, chimpancés y humanos. Muy alejados de los orangutanes, evolucionaron humanos, chimpancés y bonobos a partir de un antepasado común, como refleja el hecho de que comparten en torno al 98 por ciento del material genético. Hace entre cinco y siete millones de años, un grupo se ramificó y siguió su propia trayectoria, cuyos descendientes terminarían por ser los humanos modernos. Bonobos y chimpancés divergieron hace solo un millón de años. Cabe admitir que las conductas compartidas por esas tres especies caracterizaron también a nuestro antepasado común, mientras que las conductas que expresan solo los humanos se adquirieron por evolución después de la separación y son, pues, exclusivas del hombre.

Varios hallazgos empíricos recientes cuestionan ahora la tesis predominante. De entrada, el altruismo de nuestra especie tiene raíces más profundas. Se ha comprobado que los niños actúan de forma altruista desde edad muy temprana, antes de que interioricen las enseñanzas de normas de conducta. Además, los chimpancés exhiben también muestras de desinterés propio en favor de los otros. El niño muestra interés en los fines y menos en los medios para alcanzarlos. Michael Tomasello y Warneken observaron que niños de 18 meses ayudaban espontáneamente, sin que se les pidiera, recompensara o alabara la proeza. No desplegaron esa conducta en condiciones de control, cuando se establece una situación básica común. Se mostró, además, que estaban capacitados para determinar si la ayuda era necesaria o no. Los chimpancés no enseñan a sus crías cómo tratar a los demás, ni promueven la intensificación de los lazos sociales. Sin embargo, acaba de comprobarse que a veces tienen gestos altruistas, sin esperar contraprestación alguna. De donde se infiere que el altruismo no sería mero resultado de normas culturales y de socialización, aunque estas, sin duda, afianzan el altruismo. Los factores culturales podrían levantarse sobre una predisposición biológica que compartimos con nuestros parientes evolutivos más próximos.

Muy prometedora también la colaboración de William McEwan, virólogo del Laboratorio MRC de Biología Molecular de Cambridge, centrada en las posibilidades inmensas de la biología sintética. McEwan trabaja en mecanismos específicos de las células de mamífero que superan la infección vírica. Al lector quizá le sorprenda saber que los viales de ADN los encarga a una empresa que lo prepara de acuerdo con las especificaciones que él les remitió. El polvillo recibido, una vez sumergido en agua y copiado en ARN, codificará un virus que ha pergeñado. No es fantasía científica, sino tarea común en este arte de cortar y pegar con que se conoce la biología sintética. El virus proyectado se autorreplicará, aunque solo en determinadas células de cultivo tisular; provocará que cada célula que infecte emita un resplandor verde y le servirá de herramienta de trabajo para responder algunas cuestiones sobre la inmunidad antivírica. Ha diseñado el virus a partir de sus partes componentes (algunas estándar y comunes, otras únicas del virus en cuestión), utilizando secuencias que proceden de bacterias, bacteriófagos, medusas y el virus de la gripe común.

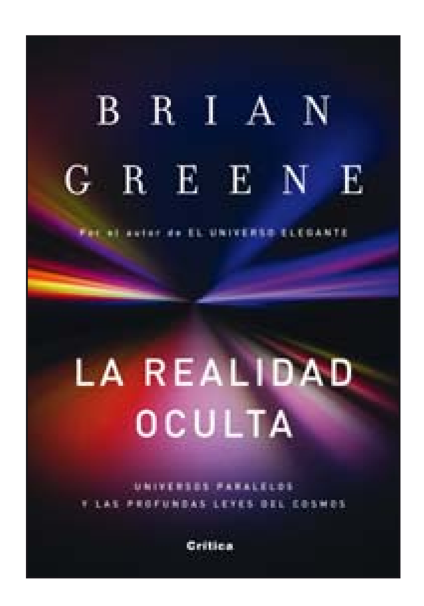
Sabido es ya que la combinación de síntesis económica de ADN, bases de datos accesibles y el dominio creciente de la química de proteínas está fraguando una revolución en el utillaje molecular. A imitación de la naturaleza, que es una experta en ensamblar y generar proteínas aptas para nuevas funciones. El secreto se esconde en el dominio de la proteína, una estructura del polipéptido que ha seguido su curso evolutivo independiente y se ha especializado en una tarea par-

ticular (una actividad enzimática, por ejemplo).

Los mecanismos de defensa intracelulares reconocen específicamente y desarman a los patógenos del interior de la célula. Se trata de un tipo de inmunidad que hemos de añadir a los dos clásicos, a saber, el sistema inmunitario innato y el adaptativo. El estudio del sistema inmunitario intrínseco se ha venido restringiendo a la interacción con los retrovirus. Los retrovirus, viejo azote de los vertebrados, violan el dogma central de la biología (ADN transcrito en ARN traducido en proteína), porque son ARN capaces de generar copias en ADN de sí mismas e insertar ese código troyano en el genoma del huésped.

Un miembro de la familia de los retrovirus son los lentivirus, que llegaron a los humanos en forma de VIH. Protagonista indiscutible de la inmunidad intrínseca es la proteína TRIM-5. La variante humana de esta proteína reduce solo marginalmente la replicación de VIH-1, el virus del sida. ¿Cómo ingeniar un plan de resistencia contra esa epidemia de millones de afectados? En América del Sur acaba de suceder un fenómeno fascinante. En monos nocturnos (*Aotus lemurinus grisemembra*), TRIM-5 se ha fusionado con una proteína de la que depende el VIH-1 para su replicación óptima. La proteína de la fusión resultante, TRIMCyp, reduce la replicación de los lentivirus en varios órdenes de magnitud, por lo que convierte a los monos en inmunes al ataque del virus. Esta técnica de fusión natural ha pasado a la biología sintética, capaz ya de crear conmutadores génicos y secuencias de una manera predecible. Es un nuevo campo excitante para la aplicación terapéutica de la biología molecular.

—*Luis Alonso*



LA REALIDAD OCULTA. UNIVERSOS PARALELOS Y LAS PROFUNDAS LEYES DEL COSMOS,

por Brian Greene. Editorial Crítica; Barcelona, 2011.

Multiversos

La pluralidad no debe postularse sin necesidad

Las historias de universos paralelos son comunes en la ciencia ficción y el cine, pero pocos habrán considerado la posibilidad de que estos mundos existan de verdad. Brian Greene, en su último libro, nos muestra que lejos de ser una posibilidad descabellada de alguna teoría marginal, la existencia de muchos universos es una consecuencia común en numerosos escenarios de la relatividad general, la cosmología inflacionaria o la teoría de cuerdas. El modo en que esas teorías predicen otros universos y las implicaciones para nuestra comprensión del mundo en el que vivimos constituyen los temas de este libro.

Si el universo es espacialmente infinito (tal y como las medidas experimentales y la relatividad general parecen indicar), debe estar dividido en dominios separados. El tamaño de estos dominios viene dado por la distancia que la luz ha podido recorrer en los 14 mil millones de años desde la gran explosión. Todos esos infinitos dominios tendrían las mismas leyes de la física que el nuestro y, aunque sería imposible visitarlos, en el libro se argumenta que muchos de ellos tendrían copias de usted y mías, de nuestro sistema solar y de nuestra Tierra, así como otras cosas muy distintas.

Pero cuando la cosmología inflacionaria y la teoría de cuerdas entran en el juego, aparecen posibilidades aún más interesantes.

Si la teoría de cuerdas es cierta, muchas de las propiedades del universo en el que vivimos (las masas de las partículas fundamentales o los valores de las constantes de acoplamiento) pueden surgir de forma dinámica. En este caso, los distintos universos tendrán propiedades físicas diferentes. En otros universos, el electrón podría ser mas pesado que el protón y la materia no se parecería en nada a la que observamos en nuestro mundo.

Esa posibilidad parece excitante: ¡otros universos con leyes físicas distintas de las nuestras! Preguntas que ahora mismo se consideran fundamentales en física teórica —¿por qué el protón es aproximadamente 2000 veces más pesado que el electrón?— pueden verse desde una perspectiva diferente.

En un mundo donde los protones pesasen lo mismo que los electrones, los procesos necesarios para que hubiese vida, tal y como la conocemos, no podrían tener lugar. Tradicionalmente, la respuesta de que los protones son 2000 veces más pesados que los electrones «porque si ese número fuese muy distinto, no estarías aquí preguntándotelo» no se ha considerado una explicación científica válida, sino más bien una tautología.

Sin embargo, la posibilidad de que existan varios universos con valores distintos de los parámetros fundamentales cambia la cosa. De repente, la absurda respuesta deja de ser tan absurda: si hay muchos universos, nosotros tenemos que vivir en uno en el que la vida pueda tener lugar tal y como la conocemos. Este «principio antrópico», usar nuestra existencia para seleccionar entre teorías o parámetros, es un tema actual en física.

De un lado están los que creen que puede dar la respuesta a muchas cuestiones básicas que se nos han resistido hasta ahora. Como bien señala Greene, puede que preguntarse sobre el valor de la masa del electrón sea como intentar «deducir» la distancia entre la Tierra y el Sol: sencillamente tiene el valor que tiene por casualidad; si fuese muy distinto del que es, estaríamos viviendo en otro planeta, o seríamos muy distintos de como somos. Del otro lado están los que piensan que los argumentos antrópicos no constituyen una explicación científica válida.

Es un tema delicado, pero el autor hace un serio esfuerzo por explicar las distintas posiciones y los argumentos que las sostienen. ¿Qué haría falta comprobar para que el principio antrópico pudiera considerarse una explicación científica?

¿Cuán lejos nos hallamos de esa posibilidad? ¿Impone el principio antrópico límites al conocimiento?

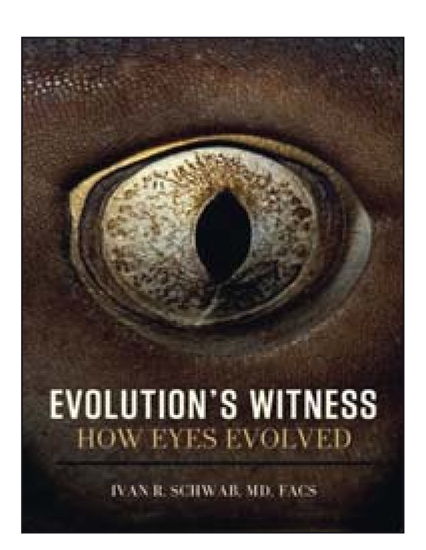
El lector descubrirá otros tipos de universos en este libro. Veremos que la termodinámica de los agujeros negros y la teoría de la información se encuentran en el mundo de la gravedad cuántica. En ese mundo, nuestro universo parece ser un reflejo de lo que pasa en la frontera (el «borde»). Este principio holográfico parece ser una de las mejores pistas que tenemos para llegar a comprender el comportamiento cuántico de la gravedad. El padre de la computación moderna, Alan Turing, nos abrirá las puertas a una infinidad de mundos simulados y a las muchas cuestiones que esta posibilidad deja sin resolver.

La parte del libro dedicada a la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica me ha gustado menos. En esta discusión, el concepto clave es la decoherencia, y relega, casi por completo, el problema de la medida a una cuestión filosófica. En setenta años hemos aprendido mucha mecánica cuántica y es necesario que la divulgación venza la inercia de narrar el problema de la medida al estilo de un poema épico, con Bohr y Einstein de protagonistas.

En resumen, el libro es un ejercicio de especulación científica, donde se exprimen las últimas consecuencias de unas teorías que en el mejor de los casos conocemos parcialmente.

Ninguno de los escenarios planteados ha pasado el necesario test de hacer predicciones que sean confirmadas. Además, habrá muchos que piensen, tal vez con razón, que hay problemas más fundamentales que resolver en nuestro universo antes de preocuparnos por lo que pasa en otros. Sin embargo, el libro resulta interesante y apunta que es más difícil construir teorías cosmológicas viables con un único universo que con muchos. En cualquier caso, Greene ha roto con el casi ubicuo esquema de los libros de esta temática: en vez de unos capítulos introductorios sobre relatividad y mecánica cuántica, el lector se encontrará con un texto fluido donde las explicaciones sobre relatividad general, inflación, teoría de cuerdas, mecánica cuántica, computación o gravedad cuántica se entrelazan con los diversos escenarios de multiversos en un texto interesante de leer, más —en mi opinión— por las diversas explicaciones científicas en sí, que por el valor científico de los muchos universos.

—Alberto Ramos
Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY)



EVOLUTION'S WITNESS. HOW EYES EVOLVED,

por Ian R. Schwab. Oxford University Press; Oxford, 2012.

El ojo y su evolución

De los fotorreceptores al sistema cerebral de la visión

La teoría de la evolución ha tenido en la adquisición del ojo el crisol genuino de su validez. En 1802, William Paley ponderaba las maravillas de la creación en su *Natural theology*. Atendía, sobre todo, a la refinada complejidad del ojo humano, tan preciso como un reloj, tan potente como un telescopio. Ojo y telescopio compartían los mismos principios y se sometían a las misma leyes de transmisión y refracción de la luz. Para subrayar la perfección del diseño del ojo, recuerda que los rayos de luz deben ser refractados por una superficie más convexa cuando se transmiten a través del agua que cuando pasan del aire al ojo. Por eso, el ojo del pez porta más redondeado el cristalino que el de los animales terrestres. El ojo le planteó ya un reto a Darwin, que reconoció la dificultad de atribuir a la mera selección natural la finura de los detalles que convergían en su formación. Difícil, pero no imposible, atestiguaba en *On the origin of species*, de 1859. La base que le faltaba a Darwin se ofrece en este libro de Ian R. Schwab, que hemos de inscribir en la tradición de los clásicos *The vertebrate eye,* de Gordon L. Walls (1942) y *The vertebrate retina*, de Bob Rodieck (1973).

El ojo humano consta de tres capas de tejido. La exterior, o esclerótica, encierra la estructura y se prolonga en la parte anterior con la córnea transparente. La capa media, o úvea, se divide en coroides, cuerpo ciliar e iris. La coroides aporta nutrientes a la retina. El iris es la porción coloreada. El cuerpo ciliar, un espesamiento de la úvea, produce fluido intraocular para mantener la presión dentro del globo ocular. La capa más profunda corresponde a la retina, sensible a la luz. La retina consta de células estrechamente empaquetadas, denominadas fotorreceptores, que se concentran en la mancha.

La vida cuenta con unos 3750 millones de años de historia. Aunque en buena parte de ese recorrido no dejó huellas, sí persistió un testigo privilegiado de su evolución, la fotorrecepción. El rastreo de la fotorrecepción nos revela la naturaleza de la evolución en general y del ojo en particular, porque la vida progresó con la luz y con su percepción. Ambas resultaron determinantes para la supervivencia de los organismos y su éxito reproductivo. De ahí que la selección natural primara los genes y las combinaciones genéticas que aumentaban la eficacia funcional del ojo. Tales unidades genéticas se fueron acumulando de manera gradual hasta la constitución del ojo de los vertebrados, de alta complejidad y eficacia. La selección natural no crea los materiales en bruto (los genes) sobre los cuales actúa. El ojo humano, amalgama de estructuras de origen y trayectoria dispares, no apareció súbitamente en toda su perfección actual, sino que su formación vino propiciada por la integración de muchas unidades genéticas.

Al poco del alba de la vida, un organismo pionero incorporó una forma de vitamina A en su membrana celular. Había empezado el desarrollo de la visión, de los ojos, desde esa fotorrecepción inicial. La evolución paulatina produjo configuraciones muy dispares. El órgano más sencillo de la visión se encuentra en ciertos organismos unicelulares que poseen enzimas o pigmentos sensibles a la luz, que les orientan hacia la superficie del estanque

donde se alimentan de las algas que allí medran. Algunos animales exhiben puntos fotosensibles en su epidermis. Por el tiempo de la eclosión de formas animales del Cámbrico (hace más de quinientos millones de años) advinieron dos formas de ojo radicalmente diferentes: el ojo cameral de los vertebrados, con un cristalino, y el ojo compuesto, de importantes invertebrados, con múltiples unidades repetidas, dotadas cada una de una lente. Esas formas morfológicas básicas evolucionaron y se expandieron en un intervalo temporal de unos diez millones de años.

Las ubicuas cianobacterias, organismos antiquísimos, son fotorreceptoras merced a su clorofila. Utilizan este fotopigmento para producir energía en forma de hidrato de carbono. Pero no solo generan nutrimentos con el empleo de la luz solar (fotoautótrofos). A través de la endosimbiosis, un agente común de cambio en la historia primitiva de la vida, los protistas englobaron a las cianobacterias, incorporándolas para formar cloroplastos. Los cloroplastos convierten la luz solar en energía y rinden oxígeno como producto residual. Otros procariotas incorporarían un compuesto diferente. La familia de la rodopsina, que abarca la bateriorrodopsina, proteorrodopsina y ochocientos miembros más, puede capturar la energía de la luz y transferir esa energía a una célula a través de proteínas móviles. Esa capacidad, aportada por el retinal, derivado de vitamina A, constituye una bomba de protones. El retinal pertenece a una clase de compuestos conocidos por cromóforos; combinado con la proteína opsina, da lugar a la rodopsina.

Tras descubrirse que todos los ojos compartían la opsina, para recoger la luz, se estudió la secuencia de ADN codificadora del polipéptido. Habría una forma primitiva de los genes *Pax* y sus proteínas codificadas. Estos intervienen en la formación del ojo (cabeza y nariz). Un gen *Pax*, el *Pax6* se ha conservado con extraordinaria fidelidad en muchos linajes metazoos; representa una fracción importante de los genes necesarios para la producción del ojo. Las familias de opsina se superponían con los árboles filogenéticos de sus portadores. Cuando la técnica se aplicó al cristalino, el asunto se complicó. Enzimas que solían darse en el hígado aparecieron también en el cristalino de ciertas aves. No solo las proteínas del cristalino procedían de distintas fuentes, sino que la propia estructura de tales lentes divergían entre sí. El retinal A y quizá las opsinas estuvieron presentes en el último antepasado común de arqueas y bacterias. Surgieron de una vez y pudieron transferirse fácilmente de una célula a otra, transferencia génica lateral entre procariotas que permite que organismos lejanamente emparentados o sin parentesco ninguno intercambien información. La transferencia génica lateral representa un canal importante de intercambio genético, con la replicación celular y la reproducción; tuvo, además, una profunda repercusión sobre la visión.

Además de la clorofila y la familia de la rodopsina, entraron en escena las fotoliasas y su progenie química, los criptocromos. Estas proteínas aparecieron como mecanismos reparadores al poco de que surgieran las primeras células y pudieron ser uno de los compuestos fotosensibles y fotorreceptores iniciales. Utilizaron luz azul para reparar el ADN y el ARN, y persisten en procariotas vivos. Los criptocromos ayudan a regular la fotoperiodicidad (conducta de respuesta del organismo al ciclo circadiano de luz y obscuridad). Se hallan por todo el reino animal. Los compuestos fotorreceptores (familia de la rodopsina, fotoliasas, criptocromos u clorofila) cumplirían múltiples funciones en aquellas células primigenias: defenderlas de una luz ultravioleta disgregadora de las moléculas, mediar la fototaxis negativa para evitar la luz ultravioleta intensa, restaurar ácidos nucleicos y, por fin, capturar y almacenar energía.

Euglena gracilis es un eucariota unicelular, un protista, que representa un tiempo anterior a los metazoos y a la división entre plantas y animales. Posee una mancha ocular, o estigma, que contiene rodopsina y flavinas para la fotorrecepción. La euglena puede fagocitar, erigiéndose en heterótrofo, o bien fotosintetizar, constituyéndose en autótrofo. La mácula se encuentra en la base del flagelo, trabaja en concierto con este y permite que el organismo se mueva hacia la luz para la fotosíntesis. Posee esta eucariota otros cromatóforos dentro de su citoplasma, gracias a los cuales responde positiva o negativamente a la luz en diferentes tiempos. Los protistas continuaron su desarrollo a lo largo de mil quinientos millones de años y han desarrollado ojos con una mínima organización neurológica. El dinoflagelado plantónico *Erythropsidium* avanza un paso más. Su «ojo» debe ser el más pequeño de todos, pues el organismo mide solo 50-60 micrómetros. Presenta un oceloide, una mancha ocular con un cristalino.

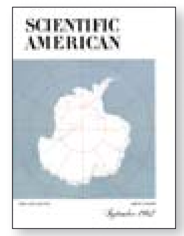
Corales y medusas poseen un gen que guarda un estrecho parecido con *Pax6*. Los corales son muy sensibles a la luz; presentan fototaxis, aunque carecen de instrumento de visión o receptáculo de luz. Reconocen la luz azul, omnipresente en los océanos, mediante sus critptocromos. Pero fueron los primeros en hacerse con células y proteínas especializadas en la fotorrecepción y visión. Los cromóforos protegen a los corales al reflejar o absorber luz. Las medusas, que precedieron a la explosión del Cámbrico en decenas de millones de años, gozan de una red neural organizada en anillos nerviosos y ganglios. Presenta un mecanismo visual elemental: cuatro ocelos y dos ojos complejos de tipo cameral, evolucionado a partir de los primeros.

El comienzo de la construcción de un ojo se halla en la célula fotorreceptora. Las moléculas fotorreceptoras pudieron haberse confinado en la membrana de la célula o aislados en un área, como en ciertos protistas. Las moléculas fotorreceptoras de células individuales son más eficientes, especialmente para definir la dirección. Los primeros pasos hacia delante supusieron la combinación de gránulos de pigmentos obscuros y células fotorreceptoras. Los gránulos de pigmentos permiten limitar la dirección de la luz. Desde muy pronto se dispuso de melanina y otros pigmentos biológicos. Esos gránulos pigmentarios obscuros difieren de los fotopigmentos. Aquellos sirven para detener la luz a modo de barrera opaca, no para reaccionar ante ella. Varias de esas células se congregaron, o bien se replicó una misma célula. En cualquier caso se combinaron para crear una mancha ocular, un rudimento de ojo.

Una vez establecida la mancha ocular, la capacidad de reconocer características espaciales (peculiar del ojo) adopta un mecanismo de invaginación o un mecanismo de evaginación. Merced a la invaginación se forma una estructura cameral. Un grupo de células concentradas, transparentes o translúcidas, del interior de la concavidad añade una lente focalizadora al sistema, un ojo elemental u ocelo. Por invaginación se crearon ojos de tipo cameral de invertebrados y vertebrados. Tal es la explicación de que ciertos invertebrados (calamar) y vertebrados (peces) porten ojos muy parecidos, al menos superficialmente.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



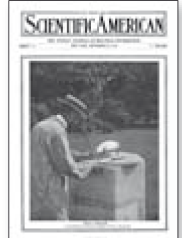
Septiembre 1962

Fauna antártica

«Durante mucho tiempo se había sostenido que la vida escaseaba en las masas de agua subyacentes a las grandes placas de hielo del continente antártico, como en los mares de Ross y Weddell. Tal suposición ha sido desmentida hace poco por el hallazgo de peces de gran tamaño (en especial, nototénidos), además de invertebrados de fondo congelados in situ. Habían quedado expuestos muy por encima del nivel del mar, en la superficie batida por el viento de la plataforma de hielo Ross, cercana a la base estadounidense del estrecho de McMurdock. Los restos reposaban en la parte superior de una capa de hielo de más de 30 metros de espesor y, al parecer, habían quedado atrapados por congelación en el fondo de la placa cuando el hielo entró en contacto con el lecho marino. Una datación preliminar con carbono 14 revela que habrían sido necesarios unos 1100 años para que esos especímenes se abrieran camino a través del hielo.»

Telescopio rechazado

«El secretario de Defensa Robert McNamara ha cancelado la construcción del radiotelescopio de 183 metros para la Armada a causa del aumento de los costes y la disminución de su valor militar. La estructura de 30.000 toneladas, instalada en Sugar Grove (Virginia Occidental), se habría convertido sin duda en el mayor radiotelescopio totalmente orientable del mundo. En él ya se habían invertido más de 41,7 millones de dólares. Según un informe del *New York Times*, su misión consistía en captar radiomensajes procedentes de otros lugares del globo al detectar su reflexión desde la Luna. Aunque la Armada no lo confirmó, aclaró que tal misión pueden ahora desempeñarla los satélites y otros instrumentos electrónicos.»



Septiembre 1912

Un coloso de cemento

«La estatua de hormigón del señor Lorado Taft dedicada al indio americano (*fotografía*) ha sido descrita en numerosos artículos de gran mérito literario. Quien escribe, en su calidad de constructor, ha sido requerido para que exponga en términos técnicos sencillos los métodos seguidos en la construcción de esta —en lo que alcanza a saber un servidor— primera estatua heroica de cemento. Fue inaugurada cerca de Oregón, en Illinois, el primero de julio de 1911 y ha estado expuesta a la vista y a la crítica del público desde que, a principios de primavera, le fue retirado el enorme molde de yeso.

—John G. Prasuhn»

El problema de la vida

«Hay otros problemas fundamentales que han ocupado la mente de los pensadores de todas las épocas y aún siguen desconcertando a los profesionales más adelantados de las ramas de la ciencia moderna. Uno de tales problemas es el de la naturaleza y el origen de la vida. El profesor E. A. Schaeffer, en su discurso inaugural ante la Asociación Británica en Dundee, se ha cuidado de no enmarañarse en penosas sutilezas "filosóficas". No ha intentado definir la vida, pero ha dicho que "los avances recientes del conocimiento han sugerido que la probabilidad de que la línea divisoria entre la materia animada y la inanimada sea menos nítida de lo que se ha venido considerando, por lo que han aumentado las dificultades para dar con una definición universal".»



Modelo en arcilla de un monumento de hormigón de proporciones colosales dedicado al indio americano, en el norte de Illinois. La imagen procede de un artículo escrito por el ayudante del artista, 1912.

Medicina de guerra

«Este año las maniobras del departamento de sanidad del gobierno militar de París resultaron inusitadamente interesantes. Los ejercicios incluyeron la organización de un servicio de evacuación en automóvil, además de curiosas experiencias sobre el uso de perros adiestrados en la búsqueda de heridos. La pieza más destacable de los nuevos equipos es un quirófano autotransportado, en el que pueden realizarse intervenciones quirúrgicas en el frente en condiciones tan favorables como las que permite cualquier hospital. Las heridas abdominales graves, muy corrientes en la guerra moderna, no pueden ser intervenidas adecuadamente por los servicios de campaña ordinarios y, en muchos casos, el traslado del paciente equivale a una sentencia de muerte.»



Septiembre 1862

Riego por vapor

«Hace unos veinte años Ibrahim Pasha de Egipto instaló un motor de vapor de 100 caballos para sustituir a las 500 norias que abastecían de agua del Nilo a las huertas de Boulac. Cuando los nativos hubieron visto montada la maquinaria y les fue explicado su objeto, declararon loco al gobernador. Pero cuando vieron aquella enorme máquina arrojando columnas de agua, al instante dijeron que los occidentales habían llevado un demonio para que vaciase el Nilo. Tanto es el poder fertilizante del agua del Nilo que, cuando se instaló el motor Cornish que mencionamos, se pusieron en cultivo de 280 a 320 hectáreas en la inmediata vecindad de El Cairo. Estas se hallan ahora cubiertas de huertas y campos de caña de azúcar.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVII, N.º 10, 7 DE SEPTIEMBRE DE 1912




EVOLUCIÓN

Por qué colaboramos

Martin A. Nowak

La cooperación, lejos de constituir una fastidiosa anomalía de la evolución, se cuenta entre sus arquitectos primordiales.

AGRICULTURA

Gestión ecológica de los suelos agrícolas

Joan Romanyà Socoró

Las estrategias que mejoran la función biológica del suelo contribuyen a maximizar los servicios ambientales de los cultivos y a mantener su productividad a largo plazo.

ENERGÍA

Hidrógeno: ¿energía limpia para el futuro?

V. Artero, N. Guillet, D. Fruchart y M. Fontecave

Producirlo, almacenarlo y convertirlo en electricidad según la demanda ya es posible. Pero el proceso resulta todavía demasiado caro. Los químicos se inspiran en las bacterias para perfeccionar los catalizadores utilizados.



ASTROFÍSICA

La benevolencia de los agujeros negros

Caleb Scharf

La bestia tragamateria del centro de la Vía Láctea podría explicar la existencia y habitabilidad de la Tierra.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Alberto Ramos: *Un abanico de partículas*; Alfonso Susanna: *El olfato de las plantas*; Mercè Piqueras: *La preocupación por los recursos naturales*; José Manuel Vidal Donet: *El secreto de los controladores de élite*; M.ª José Báguena: *El médico detective*; Fabio Teixidó: *La fusión de la antártida en directo*; Tanja Sachse: *Sistemas de almacenamiento energético*; Carlos Lorenzo: *El triunfo de los titanes*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Alfredo Marcos: *Filosofía de la ciencia*; Raquel Santamarta: *Curiosidades de la física*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España